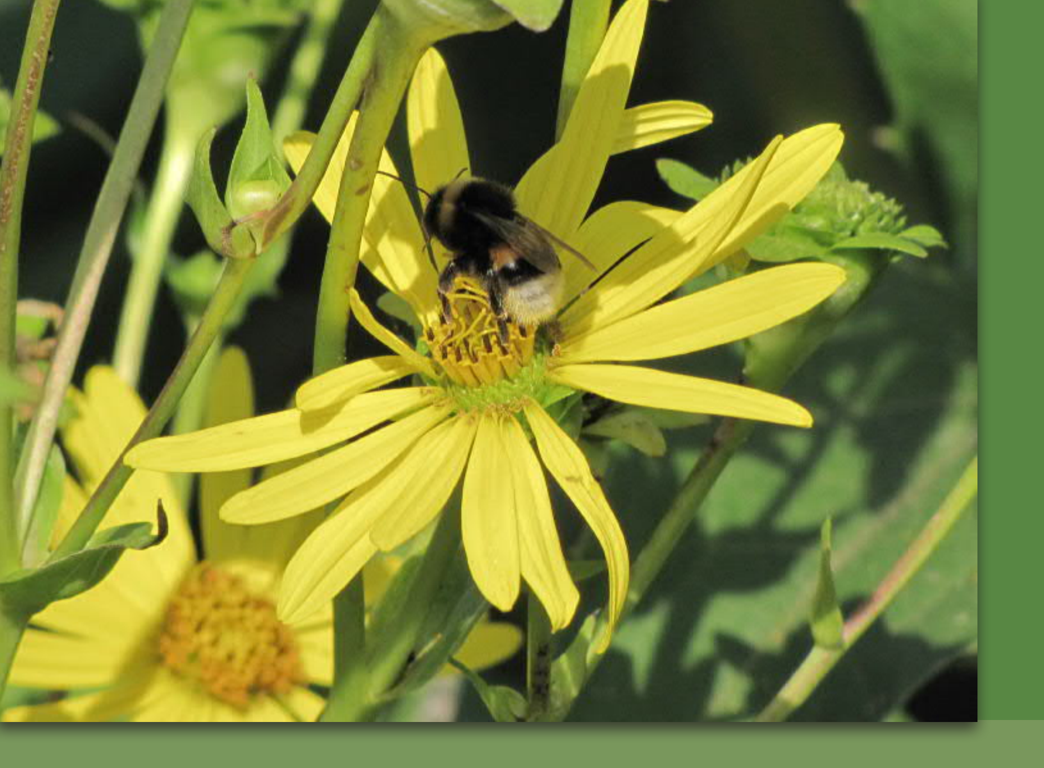


Bioenergie im Spannungsfeld

Wege zu einer nachhaltigen Bioenergieversorgung

Hans Ruppert und Jens Ibendorf (Hg.)

Universitätsverlag Göttingen

Hans Ruppert und Jens Ibendorf (Hg.)

Bioenergie im Spannungsfeld



erschienen im Universitätsverlag Göttingen 2017

Hans Ruppert und
Jens Ibendorf (Hg.)

Bioenergie im Spannungsfeld

Wege zu einer nachhaltigen Bioenergieversorgung



Universitätsverlag Göttingen
2017

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur
im Rahmen des Projektes
„Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft“

Anschrift des Herausgebers
Prof. Dr. Hans Ruppert
E-Mail: hrupper@gwdg.de

Satz und Layout: Hans Ruppert
Umschlaggestaltung: Jutta Pabst

https://univerlag.uni-goettingen.de
ISBN: 978-3-86395-164-1
DOI: https://doi.org./10.17875/gup2017-1042

Vorwort: Die wichtige Rolle der Nachhaltigkeit

Der Mensch hat seit Beginn seiner Sesshaftigkeit vor knapp 6000 Jahren seine Umwelt zunehmend verändert. Damals entstanden vorwiegend in den Flussoasen dieser Welt wie in Ägypten, China, Naher Osten, Indien, im westlichen Teil von Südamerika und in Mittelamerika durch Umwandlung von Wäldern und Grasland in Ackerland, durch die Domestizierung von Tieren, den Bau erster Siedlungen, der Produktion von Gefäßen und Metallen usw. die ersten Umweltzerstörungen wie z.B. Erosion, Versalzung und Kontamination der Böden und die Veränderungen der Biodiversität. Durch die geringe Bevölkerungszahl von wenigen Mio. Menschen war damals der menschengemachte Einfluss lokal beschränkt. Im heutigen Industrie- und Informationszeitalter haben sich diese Einflüsse vervielfacht durch die extreme Zunahme der Menschen auf 7,3 Milliarden (Stand Sommer 2015) bei gleichzeitig steigender Inanspruchnahme der Erde für die Ernährung (12 % der Landoberfläche der Erde werden ackerbaulich genutzt; mehr ist kaum möglich; FAO 2011) und für die Deckung des Energie- und Materialbedarfes (Kohle, Erdöl, Gas und Uran; Baustoffe, Metalle etc.). Wir gelangen heute wegen der Limitiertheit der nutzbaren Gaben der Erde an die Grenzen, uns mit den Ressourcen zu versorgen, an die wir uns fast selbstverständlich gewöhnt haben (Bardi 2013). Durch Ausweitung von Mobilität und Handel auf globaler Basis verbunden mit neuen Infra- und Kommunikationsstrukturen stieg massiv der weltweite Austausch von Materialien wie auch von Nahrungsmitteln - Tendenz wachsend trotz der sich immer stärker abzeichnenden Begrenztheiten.

Leider sind die Veränderungen, die gerne im Kontext der Begriffe Zivilisation und Fortschritt positiv assoziert werden, mit vielen Wirkungen verbunden, die gewollt sind oder sich ungewollt ereignen und die Zukunftsmöglichkeiten des Menschen und der belebten Welt bestimmen. In den Siedlungsbereichen der Erde, die früher Wald oder Grünland waren, haben wir zumeist ackerbaulich genutzte oder versiegelte Böden oder künstlich angelegte Parks. Aber auch viele Waldgebiete und Flusslandschaften sind von ihrer Landschaftsstruktur und dem natürlichen Artenbestand her häufig verändert. Statt von Naturlandschaften müssen wir in vielen Gebieten von menschengestalteten Kulturlandschaften sprechen. Durch die Freisetzung massiver Mengen unerwünschter Stoffe in die Atmosphäre (dazu gehört auch das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid CO_2) gibt es keine Bereiche auf dieser Erde mehr, die vom Menschen unbeeinflusst sind. Auch in den entferntesten Gegenden sind die Einflüsse luftgetragener Schadstoffe (Monks et al. 2009) wie

auch die Klimaveränderung deutlich messbar (IPCC 2013). Seit Beginn der Industrialisierung in den letzten 200 Jahren - also in nur etwa einem Tausendstel unserer Anwesenheit als homo sapiens (dem weisen, klugen, einsichtsvollen Menschen) auf dieser Erde - hat es dieser kluge Mensch geschafft, die Hälfte des uns leicht zugänglichen Öls und Gases und Teile der Kohle zu verbrauchen. Die heute wichtigen Öl- und Gasvorkommen bildeten sich über etwa 100 Mio. Jahre, auf die letzten 100 Jahre bezogen wird also pro Jahr soviel Öl und Gas verbraucht, wie sich größenordnungsmäßig in grob einer Million Jahre oder mehr gebildet hatte. Für die Regeneration der Vorräte bräuchte die Erde wieder mehrere Zehner Mio. Jahre. Trotz neuer kurzfristiger Hypes bei Ölschiefer oder Schiefergas ist es absehbar, dass in wenigen Generationen unsere fossilen Energieträger nur noch mit stark steigendem Aufwand und extremen Umweltbelastungen geborgen werden können (Bardi 2013).

Durch die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger, durch die Rodung von Wäldern und Grasländern und die Beseitigung von Feuchtgebieten sowie die Zementproduktion stieg der Gehalt von CO_2 (neben anderen Treibhausgasen) in unserer Atmosphäre von 280 ppm (part per million = Teile pro Mio. Teile) auf 405 ppm heute (2017) an - Tendenz steigend (Dlugokencky & Tans 2017). Eine Konsequenz ist die steigende Erwärmung der Atmosphäre über den Landmassen um knapp 1 ^{O}C in den letzten 100 Jahren. Daraus resultieren Verschiebungen der Klima- und Vegetationszonen, Einflüsse auf die Artenvielfalt, Abschmelzung von Gletschern und Eiskappen, die Erwärmung und Versauerung der Ozeane mit Stress für die Korallenriffe, Anstieg des Meeresspiegels, Zunahme von Wetterxtremen wie Starkregen- und Überflutungsereignissen oder Trocken-, Hitze- und Kälteperioden, Stürmen und allen Folgeschäden. Diese Trends werden sich in den nächsten Jahrzehnten verstärken, nicht nur global (IPCC 2013, 2014) sondern auch in Deutschland (Gömann et al. 2015). Der Klimawandel wirkt sich, beginnend im 20. Jahrhundert, als Störung in den Wäldern aus: Die europäischen Wälder werden zunehmend durch Wind, Borkenkäfer und Feuer beansprucht, was die wichtige Kohlenstoffdioxidaufnahme der Wälder erheblich schwächen kann (Seidl et al. 2014). Der Temperaturanstieg verstärkt (neben der Vernichtung von Lebensräumen) die Gefahr, dass immer mehr Tier- und Pflanzenarten aussterben werden. Die Erderwärmung bedroht jede sechste Art, wenn wir mit dem „business as usual" (weiter so wie bisher) weitermachen und nicht die Emissionen der Treibhausgase massiv zurückfahren (Urban 2015). Auch die Kapazität der Ozeane zur Aufnahme von CO_2 wird sinken, da sich das Meerwasser erwärmt und die Festlegung von CO_2 in den Karbonatschalen ozeanischer Organismen durch die Versauerung der Ozeane abnehmen werden (Hennige et al. 2014). Die beiden wichtigen CO_2-Senken Pflanzen und Ozeane werden voraussichtlich immer schlechter funktionieren, so dass anteilmäßig immer mehr emittiertes CO_2 in der Atmosphäre landen wird. Die Einflüsse des Wetters auf die zukünftigen Erträge in der Landwirtschaft stehen erst am Anfang der Untersuchungen (Iizumi & Ramankutty 2015).

Der Mensch hat dem Zeitalter der von ihm verursachten Veränderungen auf der Erde sogar einen eigenen Namen gegeben: das Anthropozän, die Epoche des Menschen, des Veränderers der Natur (s. Kap. 1.3). Anbetracht der vielen negativen Einflüsse des Menschen auf den zugänglichen Bereich der Erde durch die Ausbeutung ihrer Lagerstätten, Böden und des Wassers, der Degradation der Böden durch Erosion, Versalzung und Verschmutzung, der Belastungen von Wasser und Luft und der massiven Eingriffe in die Biosphäre muss viel öfters die Frage gestellt werden, welche Rolle der Mensch in Zukunft in unserer belebten Welt, der Ökosphäre, spielen möchte. Er hat wegen der Begrenztheiten in dem uns zugänglichen Bereich der Erde nur die Chance, sich anzupassen und mit der Natur zu harmonieren oder er verschwindet aus der Natur, da er die Grundlagen, von denen er abhängt, immer stärker zerstört.

Wir sind in vielen Bereichen (vielleicht mit Ausnahme unserer Erfindergabe) an den Grenzen des Wachstums angelangt und brauchen neue, die Problemkreise berücksichtigende und vernetzende Lösungen, die weitaus mehr als bisher im Einklang mit den vorhandenen Potentialen und Möglichkeiten dieser einen Erde stehen müssen. Die Gaben dieser Erde müssen wir schonen und erhalten. Wir dürfen sie nicht einem kurzfristigen, materiell gesteuerten Wahn opfern ohne Rücksicht auf die Bedürfnisse vieler Menschen bereits heute und insbesondere auch in der Zukunft.

Vor diesem Hintergrund ist die Motivation des Interdisziplinären Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE) an der Universität Göttingen und den Autoren dieses Buches zu sehen: Wege aufzeigen, wie sozialverträglich, bezahlbar sowie natur- und landschaftsverträglich eine alternative Energieversorgung auf erneuerbarer Basis zukunftweisend aufgebaut werden kann. Das wird in diesem Buch exemplarisch dargestellt für die nicht unproblematische Bioenergie. Ziel ist es, einen von der Gesellschaft getragenen und akzeptierten, ökologisch verträglichen, rentablen Anbau von Energiepflanzen unter Harmonisierung mit den sonstigen Ansprüchen an die Flächen zu erreichen. Bereits 1997 war die erneuerbare Energieversorgung eines der zentralen Themenfelder des sich gründenden IZNE, in dem sich Wissenschaftler aus unterschiedlichsten Fakultäten der Universität Göttingen zusammenfanden, um über nachhaltige Entwicklung und Zukunftsfragen nachzudenken und Forschungsprojekte anzustoßen. Wir begannen 2000 damit, die Strom- und Wärmeversorgung des Dorfes Jühnde im südlichen Niedersachsen im Zusammenwirken mit der Bevölkerung auf Biomasse umzustellen. Seit 2005 werden dort etwa 70 % der Häuser mit erneuerbarer Wärme versorgt, und es wird mehr als doppelt so viel Strom produziert als verbraucht (Ruppert et al. 2008).

Zunächst wurde die Bioenergie durch mehrere Anpassungen des Erneuerbaren Energiengesetzes EEG gestärkt. In Deutschland lieferte die Bioenergie im Jahr 2015 insgesamt 219 Terawattstunden (TWh) Strom, Wärme und Kraftstoffe und hatte damit einen Anteil von 58 Prozent an der gesamten Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien (Pieprzyk et al. 2016). Nach dem Anwachsen der Biogasanlagen in Deutschland auf etwa 8000 im Jahr 2014 und durch die verstärkte Diskus-

sion zur Rolle und den Auswirkungen der Bioenergie wird heute der Bioenergie viel kritischer begegnet als in Zeiten der Euphorie um 2005. Hat also die erneuerbare Energie aus Pflanzen schon nach wenigen Jahren ihre „Unschuld" verloren? Viele der Argumente gegen die Bioenergie wie z.B. „Gefahr der Vermaisung", „Monotonisierung der Landschaften", „Verlust der Biodiversität und negative ökologische Effekte", „Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion (Frage der Flächenverfügbarkeit)" werden in diesem Band kritisch betrachtet.

Es werden aber auch die durchaus auch positiven Möglichkeiten der Energiegewinnung aus Biomasse beleuchtet. Wir können z.B. zeigen, dass Energiepflanzen die Landschaft bereichern und attaktiver machen können und Schutz und Nutzung der Landschaft synergetisch zusammengeführt werden können (s. kontroverse Diskussion bei Dauber & Bolte 2014). In Arealen mit wenig Mais und Raps kann sogar der Anbau dieser beiden Pflanzen einseitige Getreidefruchtfolgen auflockern. Noch eindrucksvoller und zu mehr Akzeptanz bei der Bevölkerung führend ist, wenn auch andere ertragsstarke Energiepflanzen wie z.B. die Durchwachsene Silphie oder abwechslungsreiche Anbausysteme mit Sommerungen und Winterungen oder auch Mischfruchtanbau Einzug in unsere Flure halten. Wichtige Ergebnisse unserer Untersuchungen wurden bereits in einem anderen Fachband niedergelegt (Ruppert et al. 2013).

Der folgende Ausblick zu den **zukünftigen Chancen der Bioenergie** stand nicht im Fokus unserer Untersuchungen, macht aber die Bedeutung der Bioenergie für die Energiewende sehr deutlich. Auch in Zukunft muss die Bioenergie durch ihre multiple physikalische Form (fest, flüssig, gasförmig), ihre Lagerfähigkeit und die Möglichkeit eines flexiblen, bedarfsorientierten Einsatzes eine besondere Rolle im Kontext der von der Verfügbarkeit her fluktuierenden erneuerbaren Energieangebote aus Wind, Wasser, Photovoltaik und Solarthemie spielen, obwohl sie zu den teuersten erneuerbaren Energieformen gehört. Bedarfsorientierte Stromlieferung aus Biogas könnte schon heute als einzige erneuerbare Energieform den Bedarf an Stromspeichern deutlich reduzieren, wenn eine intelligente Anpassung über Regelsysteme an die Nachfrageentwicklung erfolgt. Hier ist vor allem an eine Ausgleichsfunktion in den kühlen Jahreszeiten zu denken, wenn Photovoltaikanlagen nur minimal Strom produzieren. Genau in dieser Zeit wird auch die bei der Stromerzeugung aus Biogas entstehende Wärme benötigt. Voraussetzung für diese am Bedarf ausgerichtete Entkopplung ist, dass dieses Konzept einen finanziellen Anreiz erfährt, was vermutlich günstiger ist, als im gleichen Maß teure Zwischenspeicher oder Gaskraftwerke zu bauen oder existierende Kohlekraftwerke als Reserve vorzuhalten. Diese besondere Qualität des Biogases sollte in zukünftigen EEG-Novellen verstärkt berücksichtigt werden - mit der Direktvermarktung und der Flexibilitätsprämie wurden einige Weichen bereits gestellt. Biogasanlagen sollten für die Zukunft so umgebaut bzw. ausgelegt werden, dass sie vorwiegend in den kühlen Jahreszeiten Gas produzieren, eine Gasbevorratung bzw. eine intelligente Fütterung der Biogasanlage für kurzfristige Stromfluktuationen vorgesehen ist und die Anlagen aus Effizienzgründen an ein Nahwärmenetz angebunden sind. Es geht

also nicht mehr um eine maximale Stromproduktion, sondern um die Systemdienlichkeit und Integration der Bioenergie in den erneuerbaren Stromverbund als Teil eines flexiblen Last- und Einspeisemanagements (AEE 2016). Biogasanlagen können damit einen Beitrag zur Versorgungssicherheit, Kostensenkung und zum Klimaschutz leisten. Im Rahmen der EEG Direktvermarktung ist die Option der „Abschaltbereitschaft" vorhanden. So können Biogasanlagenbetreiber bei Stromüberschuss im Netz (z.B. bei sonnenreichen und/oder stürmischen Wochenenden) eine Prämie erhalten, wenn sie bereit sind, genau dann mit ihrer Stromproduktion zu pausieren (Stichwort: Negative Energiedienstleistungen). Ein Zurückfahren der EEG-Regelungen auf Restbiomassen und biologische Abfälle greift zu kurz. Energieerzeugung aus diesen überschüssigen Biomassen ist sinnvoll, stellt aber nur einen sehr kleinen Anteil unseres Strom- und Wärmebedarfes dar und kann nur begrenzt bedarfsgerecht eingesetzt werden. Diese Biomassen sind im Gegensatz zu silierten Energiepflanzen i.d.R. nicht über längere Zeit konservierbar. Inzwischen gibt es Förderaufrufe des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft über die Fachagentur Nachwachsende Rohstofffe (FNR 2017) für praxisorientierte, innovative Projekte, in denen Wege zu einer optimalen Integration der Bioenergie in die Energiewende erforscht werden sollen.

Der ländliche Raum erhält nicht nur durch die Produktion von Energie aus Pflanzen und Gülle eine neue Bedeutung, sondern er muss auch weit über den Eigenbedarf hinaus energetische Überschüsse auf Basis aller erneuerbarer Energieformen liefern, um die deutschen Ballungs- und Industrieräume als Hauptverbraucher auf eine energetisch zukunftsfähige Basis zu stellen. Die Städte schaffen dies keinesfalls alleine. Die Stadt-Land-Partnerschaft ist neu zu beleben. Die Bioenergie kann hier eine Vorreiterrolle einnehmen, wenn ihre Flexibilisierung als Puffer- oder Regelenergie sowohl technisch auf breiter Ebene als auch vom Anreizsystem her vorangetrieben wird (z.B. Ortwein et al. 2014; Thrän et al. 2014; Trommler et al. 2016; Pieprzyk et al. 2016).

Gliederung des Buches

Dieser Band basiert auf einem vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, Hannover geförderten Forschungsverbundvorhaben mit dem Titel „Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft" (kurz „Bioenergie im Spannungsfeld" oder BiS). In diesem interdisziplinären Projekt sollten Wege aufgezeigt werden, wie Energiepflanzen unter Beachtung der sozialen, ökonomischen und ökologischen Facetten der Nachhaltigkeit angebaut und energetisch genutzt werden können. Das Buch ist gegliedert in drei Hauptteile.

Teil 1 geht auf die wichtige Rolle der Nachhaltigkeit ein - insbesondere auf ihre Rolle für eine Konfliktvermeidung bei der Produktion und energetischen Nutzung von Biomasse. Dazu werden zunächst in Kapitel 1.1 und 1.2 vor dem Hintergrund der gegenwärtig genutzten bioenergetischen Potenziale die zukünftig

verfügbaren globalen, deutschen und die niedersächsischen Potenziale abgeschätzt. Hier wird klar, dass nur durch veränderte Essensgewohnheiten hin zu einer gesünderen, weniger Fleisch-basierten Ernährung sowie durch Minimierung der Nahrungsmittelverluste bei Produktion, Verarbeitung, im Handel und beim Verbraucher erhebliche bioenergetische Potenziale verfügbar werden, ohne dass der Hunger zunimmt. In Kapitel 1.2.2 werden die meist sehr zurückhaltenden, teilweise konträren Aussagen von Regierungsvertretern zur angestrebten Entwicklung der Bioenergie in Niedersachsen und Deutschland zusammengeführt. Kapitel 1.3 beleuchtet die vielfältigen Prinzipien der Nachhaltigkeit Konsistenz, Suffizienz und Effizienz erweitert um die Prinzipien Achtung, Vorsicht, und Partizipation. Sie werden erläutert an Hand von Beispielen aus dem Bioenergiesektor.

Teil 2 besteht aus zahlreichen Schlüsselfragen zur Konfliktvermeidung einer nachhaltigen Produktion und energetische Nutzung von Biomasse auf lokaler bzw. regionaler Ebene. Diese Fragen wurden möglichst interdisziplinär aus der Sicht aller Projektbeteiligten beantwortet und sollen dem Leser die wichtigsten Ergebnisse des Projektes vermitteln, ohne „zu wissenschaftlich" zu werden. Die Hauptpunkte sind:

Lokale Ebene:

- Prinzipien und Kriterien für eine nachhaltige energetische Biomassenutzung (Kap. 2.1.1)
- Sicherstellung der Partizipation der Bevölkerung und lokale Anpassung der Bioenergiekonzepte (Kap. 2.1.2)
- Bioenergieerzeugung auf ökologisch sensiblen landwirtschaftlichen Flächen und Chancen für positive Umweltwirkungen (Kap. 2.1.3)
- Umweltwirkungen eines integrativen Energiepflanzenanbaus und seine ökonomischen Auswirkungen (Kap. 2.1.4)
- Bereitschaft der Landwirte zum integrativen Energiepflanzenanbau (Kap. 2.1.5)
- Bewertungsinstrumente für nachhaltigen Biomasseanbau (Kap. 2.1.6)
- Wirtschaftliche Nutzung der Bioenergie ohne Missachtung sozialer Belange (Kap. 2.1.7)
- Konfliktmanagement: energetische Biomassenutzung versus andere Raumnutzungen (Kap. 2.1.8)
- Nutzung kontaminierter Standorte für Energiepflanzenanbau (Kap. 2.1.9)
- Gefahren durch Emissionen beim Verbrennen fester Biomasse und Möglichkeiten der Verringerung (Kap. 2.1.10)
- Synthese der Antworten aus den Schlüsselfragen auf lokaler Ebene (Kap. 2.1.11)

Regionale Ebene:

- Entwicklung zu einer nachhaltigen regionalen Bioenergieproduktion und -nutzung (Kap. 2.2.1)
- Regionale Auswirkungen des Anbaus konventioneller und alternativer Energiepflanzen; Bedeutung für Natur- und Landschaftsschutz (Kap. 2.2.2)
- Bioenergie als Antrieb der regionalen Wirtschaftskreisläufe (Kap. 2.2.3)
- Regionales Konzept zur Nutzung von Wärme (Kap. 2.2.4)
- Synthese der Antworten aus den Schlüsselfragen auf regionaler Ebene (Kap. 2.2.5)

In **Teil 3** werden die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte ausführlicher dargestellt, Im Abb. V-1 sind die Titel der bearbeiteten Teilprojekte als vernetztes Schema in Kürze zusammengefasst.

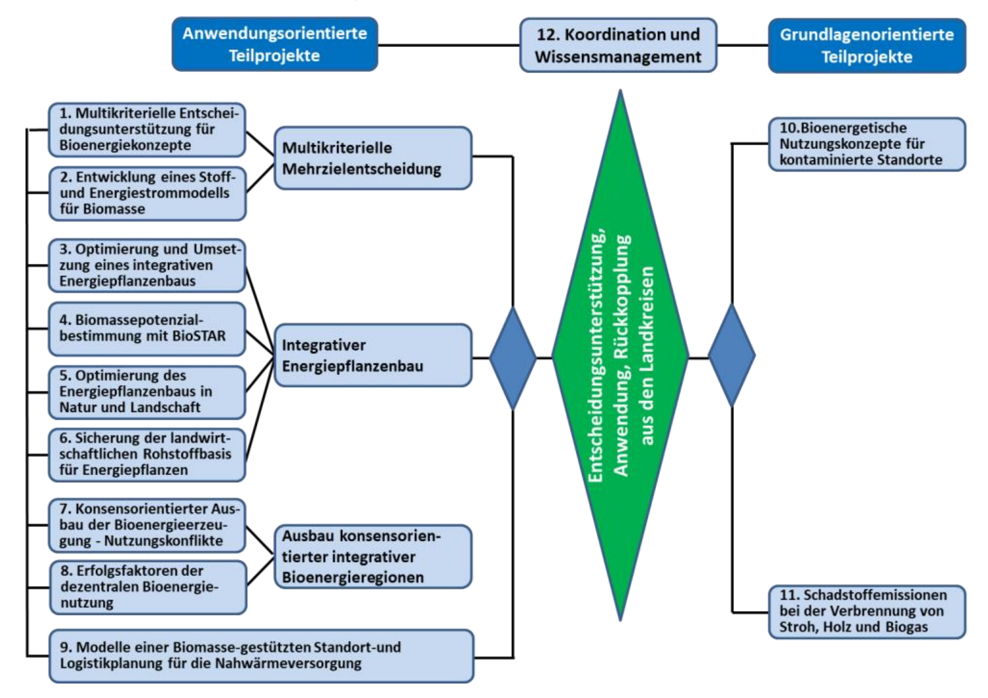


Abbildung V-1: Schematische Darstellung der Teilprojekte und ihre Vernetzung im Forschungsverbundvorhaben „Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft“

- Multikriterielle Entscheidungsunterstützung für Biomassenutzungskonzepte (Kap. 3.1)
- Stoff- und Energiestrommodell für Bioenergieanlagen bei verschiedenen Zielsetzungen (Kap. 3.2)

- Optimierung und Umsetzung eines integrativen Energiepflanzenbaus mit standortangepassten Anbaukonzepten (Kap. 3.3)
- Flächenhafte Darstellung von Biomassepotentiale für verschiedene Energiepflanzen (Kap. 3.4)
- Optimierter Energiepflanzenanbau für Natur- und Landschaftsschutz (Kap. 3.5)
- Kontext Sicherung der landwirtschaftlichen Rohstoffbasis und Entscheidungsverhalten von Landwirten (Kap. 3.6)
- Innerlandwirtschaftliche Nutzungskonflikte und betriebliches Entscheidungsverhalten beim Bioenergieausbau (Kap. 3.7)
- Erfolgsfaktoren der dezentralen Bioenergienutzung und Ausbau konsensorientierter integrativer Bioenergieregionen (Kap. 3.8)
- Modelle einer Standort-und Logistikplanung für Biomasse-gestützte Wärmeversorgung auf Basis von Nahwärmenetzen (Kap. 3.9)
- Bioenergetische Nutzungskonzepte für belastete Standorte (Kap. 3.10)
- Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Bioenergieträgern (Kap. 3.11)
- Koordination und Wissensmanagement in einem transdisziplinären Forschungsprojekt (Kap. 3.12)

In **Teil 4** wird eine Synthese der wichtigen Ergebnisse, Methoden und Instrumente für die Planung, Steuerung und Realisierung einer nachhaltigen Bioenergieversorgung auf lokaler wie regionaler Ebene vorgenommen (Kap. 4.1, 4.2).

Teil 5 enthält die Benutzerhandbücher für die MCDA-Software zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung sowie für die Software zur Ertragsmodellierung für Pflanzenerträge BioSTAR (Kap. 5.1, 5.2).

Prof. Dr. Hans Ruppert Göttingen, den 31. Aug. 2017

Umweltgeowissenschaftler
Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE), Universität Göttingen,
+ Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen

Literatur

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien 2016). Metaanalyse Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr. Forschungsradar Energiewende, 23 S. Gesichtet am 21.4.2016: http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_sektorkopplung_042016/AEE_Metaanalyse_Flexibilitaet_Sektorkopplung_apr16.pdf

Bardi, U. (2013). Der geplünderte Planet - Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen. oekom Gesellschaft für ökologische Kommunikation mbH, München, 355 S. ISBN 978-3-86581-410-4.

Dauber, J., & Bolte, A. (2014). Bioenergy: Challenge or support for the conservation of biodiversity? GCB Bioenergy 6, 180-182.

Dlugokencky, E. & Tans, P. (2017). Recent Global CO_2. NOAA/ESRL. Gesichtet am 26.6.2017: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk. FAO, Rome and Earthscan, London, 285 S. ISBN 978-92-5-106614-0. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.fao.org/docrep/017/i1688e/i1688e.pdf

FNR (Fachagentur Nachsende Rohstoffe, 2017). Bioenergie optimal in die Energiewende integrieren - BMEL stellt praxisnahe Anwendungen in den Fokus. Aufgerufen am 23.4.2017: https://energiepflanzen.fnr.de/service/presse/aktuelle-meldungen/aktuelle-nachricht/?tx_ttnews%5Byear%5D=2017&tx_ttnews%5Bmonth%5D=01&tx_ttnews%5Bday%5D=09&tx_ttnews%5Btt_news%5D=9493&cHash=34b28dd7e23fd059e64fe0de1bf61c49

Gömann, H., Bender, A., Bolte, A., Dirksmeyer, W., Englert, H., Feil, J.-H., Frühauf, C., Hauschild, M., Krengel, S., Lilienthal, H., Löpmeier, F.-J., Müller, J., Mußhoff, O., Natkhin, M., Offermann, F., Seidel, P., Schmidt, M., Seintsch, B., Steidl, J., Strohm, K. & Zimmer, Y. (2015). Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Abschlussbericht: Stand 3.6.2015. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report 30, 312 S., doi:10.3220/REP1434012425000

Hennige, S., Roberts, J.M. & Williamson, P. (2014). (2014). An Updated Synthesis of the Impacts of Ocean Acidification on Marine Biodiversity. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series 75, 99 S. Gesichtet am 10.10.2014: http://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-75-en.pdf

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis.* Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 S. Gesichtet am 5.5.2015: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* - Technical Summary. IPCC WGII AR5, 76 S. Gesichtet am 15.5.2015: http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-TS_FGDall.pdf

Iizumi, T & Ramankutty, N. (2015). How do weather and climate influence cropping area and intensity? *Global Food Security* 4, 46–50

Monks, P.S., Granier, C., Fuzzi, S., Stohl, A., Williams, M.L., Akimoto, H., Amann, M., Baklanov, A., Baltensperger, U., Bey, I., Blake, N., Blake, R.S., Carslaw, K., Cooper, O.R., Dentener, F., Fowler, D., Fragkou, E., Frost, G.J., Generoso, S., Ginoux, P., Grewe, V., Guenther, A., Hansson, H.C., Henne, S., Hjorth, J., Hofzumahaus, A., Huntrieser, H., Isaksen, I.S.A., Jenkin. M.E., Kaiser, J., Kanakidou, M., Klimont, Z., Kulmala, M., Laj, P., Lawrence, M.G., Lee, J.D., Liousse, C., Maione, M., McFiggans, G., Metzger, A., Mieville, A., Moussiopoulos, N., Orlando. J.J., O'Dowd, C.D., Palmer, P.I., Parrish, D.D., Petzold, A., Platt, U., Pöschl, U., Prévôt, A.S.H., Reeves, C.E., Reimann, S., Rudich, Y., Sellegri, K., Steinbrecher, R., Simpson, D., ten Brink, H., Theloke, J., van der Werf, G.R., Vautard, R., Vestreng V., Vlachokostas, Ch. & von Glasow, R. (2009). Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environment* 43, 5268-5350.

Ortwein, A., Krautz, A., Szarka, N., Braun, J., Dotzauer, M., Wurdinger, K., Rönsch, S., Matthischke, S., Lenz, V., Trommler, M., Postel, J. & Jacobi, F. (2014). Einsatz von Biomasse zur bedarfsgerechten Energieerzeugung. *Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe* 32, FNR (Hrsg.), 82. S. ISBN: 978-3-942147-16-3. Gesichtet am 5.5.2015: http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/s/c/schriftenreihe_band_32_web_neu.pdf

Pieprzyk, B., Rojas, P., Kunz, C. & Knebel (2016). *Metaanalyse - Perspektiven fester, flüssiger und gasförmiger Bioenergieträger.* Forschungsradar Energiewende November 2016. Agentur für Erneuerbare Energien. 20 S. Gesichtet am 1.12.2016: http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_Perspektiven_Bioenergietraeger_16/AEE_Metaanalyse_Bioenergie_Nov16.pdf

Ruppert, H., Eigner-Thiel, S., Girschner, W., Karpenstein-Machan, M., Roland, F. Ruwisch, V., Sauer, B., Schmuck, P. (2008). *Wege zum Bioenergiedorf - Leitfaden für eine eigenständige Strom- und Wärmeversorgung auf Basis von Biomasse im ländlichen*

Raum. 120 S., mit DVD, ISBN 978-3-9803927-3-0. Gesichtet am 30.4.2017: https://mediathek.fnr.de/downloadable/download/sample/sample_id/193/

Ruppert, H.; Kappas, M. & Ibendorf, J (Hrsg., 2013). *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach*. Springer-Verl., Dordrecht; 451 S.; ISBN: 978-94-007-6641-9.

Seidl, R., Schelhaas M.-J., Rammer, W. & Verkerk, P.J. (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* 4 (Sept.), 806-810.

Thrän, D., Krautz, A., Scheftelowitz, M., Lenz, V., Liebetrau, J., Daniel-Gromke, J. & Nelles, M. (2014). *Auswirkungen der gegenwärtig diskutierten Novellierungsvorschläge für das EEG 2014 - Hintergrundpapier* . Überarbeitet am 31.03.2014., 14. S. Gesichtet am 5.5.2015: https://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Presseinformationen/2014/Hintergrundpapier_Bioenergie_EEG.pdf

Trommler, M., Dotzauer, M., Barchmann, T., Lauer, M., Hennig, C., Mauky, E., Liebetrau, J. & Thrän, D. (2016). *Flexibilisierung von Biogasanlagen in Deutschland - Ein Überblick zu technischen Ansätzen, rechtlichem Rahmen und Bedeutung für das Energiesystem*. Deutsch-Französisches Büro für erneuerbare Energien & Deutsches Biomassefoschungszentrum (DBFZ), 22 S. Gesichtet am 19.4.2016: http://enr-ee.com/de/bioenergien/nachrichten/leser/flexibilisierung-von-biogasanlagen-in-deutschland.html

Urban, M. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science* 348(6234), 571-573.

Danke

Das IZNE und die beteiligten Wissenschaftler bedanken sich sehr herzlich beim Fördermittelgeber, dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, für die großzügige finanzielle Unterstützung der BiS-Guppe (BiS = Bioenergie im Spannungsfeld) während der gesamten Förderperiode von mehr als 5 Jahren. Für die konstruktive, mit großem Einsatz betriebene fachliche Unterstützung durch die Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen und durch den engagierten Kreis der Gutachter aus verschiedenen Disziplinen, aber auch durch die Diskussionen mit dem Projektbeirat profitierten nicht nur die Teilprojekte, sondern es wurden auch erheblich die Synergien zwischen den Projektteilen gestärkt. Ganz herzlichen Dank an alle Aktiven aus dem Kreis der externen Unterstützer und Förderer.

Ihre BiS-Gruppe

Autorenliste (alphabetisch)

Junior-Prof. Dr. Christian **Albert**, Juniorprofessor für Landschaftsplanung und Ökosystemleistungen, Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover

Dr. Roland **Bauböck**, ehemals Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung Geographisches Institut, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie, Georg-August-Universität Göttingen

PD Dr. Anke **Daub**, Professur für Produktion und Logistik, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Georg-August-Universität Göttingen

Dr. Swantje **Eigner-Thiel**, Fakultät Ressourcenmanagement, HAWK Hochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen; ehemals Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Dipl. Geow. Wiebke **Fahlbusch**, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Jutta **Geldermann**, Professur für Produktion und Logistik, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Georg-August-Universität Göttingen

Dipl. Soziologin Wiebke **Girschner**, ehemals Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Dr. Karol **Granoszewski**, Produkt + Markt, Marktforschung, Wallenhorst; ehemals Lehrstuhl Marketing für Lebensmittel und Agrarprodukte, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen

Cornelia **Grote-Bichoel**, Energie-Ressourcen-Agentur Goslar

M. Sc. Johannes **Hermes**, Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover

PD Dr. Sylvia **Herrmann**, Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover

Dr. Gesa Sophie **Holst**, ehemals: Landwirtschaftliche Betriebslehre, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen

Dipl. Geogr. Jens **Ibendorf**, Leibnizzentrum TRUST, Leibniz Universität Hannover; ehemals Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Dipl. Sozialwirt Claus **Kannwischer**, ehemals Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Martin **Kappas**, Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung Geographisches Institut, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie; Inter-

disziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

PD. Dr. Marianne **Karpenstein-Machan**, Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Dr. Ingo **Karschin**, Professur für Produktion und Logistik, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Georg-August-Universität Göttingen

Dr. Nils **Lerche**, Professur für Produktion und Logistik, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Georg-August-Universität Göttingen

Dipl. Wirtschaftsinformatiker Nico **Michalak**, ehemals Professur für Produktion und Logistik, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Oliver **Mußhoff**, Landwirtschaftliche Betriebslehre, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen

M. Sc. Felix **Neuendorf**, Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover

Dr. Jürgen **Orasche**, Kooperationsgruppe Comprehensive Molecular Analytics, Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH)

Dipl. Geow. Tino **Pasold**, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie; Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Dr. Christian **Reise**, ehemals Landwirtschaftliche Betriebslehre, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen

Cesar Vincente **Revilla**, ehemals Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung Geographisches Institut, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Michael **Rode**, Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr. Folker **Roland**, FB Wirtschaftswissenschaften, Hochschule Harz

Prof. Dr. Hans **Ruppert**, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie; Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Volker **Ruwisch**, Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen; FB Wirtschaftswissenschaften, Hochschule Harz

Dipl.-Ing. Wiebke **Saathoff**, Fachreferentin für Landwirtschaft und Verbraucherschutz im Niedersächsischen Landtag für Bündnis90/Die Grünen, Hannover; ehemals Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover

Dr. Benedikt **Sauer**, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie; Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Dipl.-Geoökol. Meike **Schmehl**, Professur für Produktion und Logistik, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Peter **Schmuck**, Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen

Dr. Jürgen **Schnelle-Kreis**, Kooperationsgruppe Comprehensive Molecular Analytics, Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH)

Dr. Torben **Seidel**, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Achim **Spiller**, Lehrstuhl Marketing für Lebensmittel und Agrarprodukte, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Christina **von Haaren**, Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover

Dr.-Ing. Ines **Wilkens**, Fachgebiet Volkswirtschaftslehre mit Schwerpunkt dezentrale Energiewirtschaft, Universität Kassel

Dr. André **Wüste**, Klimaschutzmanager, Stadt Merseburg; ehemals Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung, Universität Göttingen

Inhaltsverzeichnis

1 Globale und regionale Potenziale von Biomasse und deren energetischer Nutzung im Kontext der Nachhaltigkeit

Die energetische Nutzung von Pflanzen sollte erfolgen unter Harmonisierung unterschiedlicher Ansprüche wie Ernährung aber auch Energiebereitstellung für die Menschen (auch Energie ist ein Lebensmittel), Erschwinglichkeit dieser Ressourcen, Einkommensperspektiven für die Landwirtschaft und Stärkung des ländlichen Raums, Erhalt von Natur, Landschaft, Artenvielfalt und Diversität im Raum sowie Klima- und Umweltschutz bei gleichzeitiger Ressourcenschonung (insbesondere der fossilen Energieträger). Motivation sollte sein, Chancen für eine gedeihliche Zukunft sowohl lokal als auch global zu bewahren und bereits jetzt für eine vertretbarere Verteilung für die Ressourcen Nahrung, Energie usw. im Sinne inter- und intragenerationeller Gerechtigkeit hinzuwirken. Dieses komplexe Geflecht ist stark vereinfacht in Abbildung 1-1 in Form eines Tetraeders dargestellt.

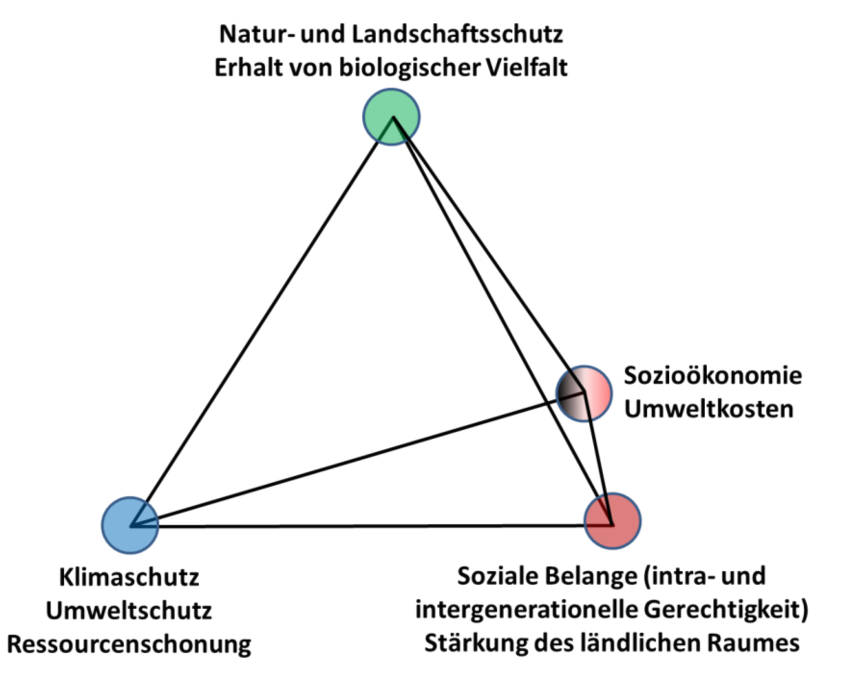


Abbildung 1-1: Vereinfachtes Beziehungsgeflecht zwischen verschiedenen Aspekten einer nachhaltigen Produktion und Nutzung von Energie aus Pflanzen

1.1 Globale und deutsche Potenziale für die energetische Biomassenutzung und deren Spannungsfelder

Hans Ruppert, Jens Ibendorf

1.1.1 Globale Fakten zur heutigen Nutzung der Bioenergie

Vor einer Abschätzung der Potentiale soll vorgestellt werden, wie hoch der heutige globale Anteil von Bioenergie auf den Sektoren Wärme, Strom und Kraftstoffen ist (alle Daten aus REN21 2016, 2017). 2015 machten die Erneuerbaren Energien 19,3 % des globalen Endenergieverbrauchs aus. Der größte Anteil davon mit 14,1 % stammt aus der Biomasse. Diese 14,1 % setzen sich wie folgt zusammen: 9,1 % aus der Nutzung traditioneller Biomasse für Wärme, 3,7 % für moderne industrielle und Haushaltswärme, 0,8 % für Transport und 0,4 % für die Stromgewinnung. Für die einzelnen Energiesektoren ergeben global sich folgende Zahlen:

- Biomassenwärmeanteil am globalen Wärmeendverbrauch für Gebäude und Kochen: 23,3 % (nur 2,8 % mit modernen Anlagen); Biomassenwärmeanteil am globalen Gesamtwärmeendverbrauch für die Industrie: 7,3 % (meist moderne Anlagen). Die Wärmeproduktion stammt zu 77 % aus fester Biomasse, 18 % aus kommunalen Abfällen, 4 % aus Biogas und 1 % aus Pflanzenöl. 38 % der Weltbevölkerung bzw. 49 % der Bevölkerung in den Entwicklungsländern benutzten 2014 zum Kochen traditionell Biomasse, besonders ausgeprägt in Afrika und Asien. In China gibt es 42,6 Mio. häusliche Kleinbiogasanlagen zum Kochen und Heizen für mehr als 100 Mio. Menschen, in Indien 4,7 Mio. Anlagen.
- Biomasseanteil am globalen Elektrizitätsendverbrauch: nur 2,4 %. Hiervon stammen 71 % aus fester Biomasse und nur 20 % aus Biogas, 8 % aus kommunalen Abfällen.
- Biomasseanteil am globalen Treibstoffendenergieverbrauch: 2,6 %. 2016 wurden 134,3 Mrd. Liter flüssige Biotreibstoffe produziert, davon waren 98,6 Mrd. Liter (73,4 %) davon waren Ethanol, 30,8 Mrd. Liter Biodiesel (23,0 %) und 4,9 Mrd. Liter raffiniertes Pflanzenöl (3,6 %).

Die erneuerbaren Energien schufen global 2016 9,82 Mio. direkte und indirekte Arbeitsplätze, davon 0,33 Mio. auf dem Biogassektor, 0,72 Mio bei der festen Biomasse und 1,72 Mio. auf dem Treibstoffsektor, also insgesamt 2,78 Mio auf dem Bioenergiesektor, was 28,3 % der Jobs innerhalb der erneuerbaren Energien ausmacht. Die getätigten weltweiten Neuinvestitionen in die verschiedenen Bioenergiebereiche sind kontinuierlich gefallen von 30,5 Mrd. US$ im Jahr 2011 auf nur 9,0 Mrd. US$ in 2016, was nur 3,7 % aller Neuinvestitionen bei den erneuerbaren Energien entspricht (REN21 2017).

1.1.2 Randbedingungen bei der Abschätzung der globalen Potenziale der Bioenergie

Die künftigen globalen, kontinentalen, nationalen, regionalen und lokalen Potentiale der Bioenergie werden sehr konträr eingeschätzt. Die wichtigsten Unterschiede der Abschätzungen werden durch die folgenden Fragen klarer:

- Werden die technischen Potentiale oder eher die nachhaltig nutzbaren Potentiale angegeben?
- Welche Flächen bzw. Reststoffe, aber auch Effizienzmaßnahmen werden in die Kalkulationen einbezogen?
- In welchem Maße können Flächen, die für die Nahrungsmittelproduktion nicht nutzbar sind, für den Energiepflanzenanbau verwendet werden?
- Ist der Anstieg der Weltbevölkerung und deren zukünftigen Bedarf an Nahrungsmittel mit entsprechendem Druck auf die nutzbaren Flächen berücksichtigt (Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmittel, ihrer Menge und Art)?
- Wie steigen die landwirtschaftlichen Erträge in Zukunft vor dem Hintergrund neuer Pflanzenzüchtungen und technischer Maßnahmen?

Die folgenden Fragen werden in den Abschätzungen meist nicht beachtet, da belastbare Werte für die Zukunft nur sehr begrenzt verfügbar bzw. mit großen Unsicherheiten behaftet sind:

- Wie wirken sich die Klimaveränderung und die Wasserverfügbarkeit auf die Entwicklung und Erträge der regionalen und globalen landwirtschaftlichen Flächen aus? Wheeler & von Braun (2013) und Dawson et al. (2016) gehen bedingt durch den Klimawandel mit einer wachsenden Zahl an Extremwetterereignissen von einer deutlichen Verschlechterung der Sicherheit der Nahrungsmittelversorgung für Milliarden von Menschen vor allem in den bereits jetzt unterversorgten Gebieten aus, was nur mit erheblichen Investionen in Anpassungsmaßnahmen kompensiert werden kann. Challinor et al. (2014) sehen insbesondere bei Weizen und Reis (nicht für Mais) kompensatorische Anpassungsmöglichkeiten vor allem in gemäßigten Klimabereichen.
- Wie wirken sich die schwindende Verfügbarkeit und die steigenden Preise vor allem der Phosphat- und Kaliumdünger aus? (de Ridder et al. 2012, Ulrich 2013; Vaccari et al. 2014). Insbesondere die künftige Phosphatverfügbarkeit wird sehr kontrovers diskuttiert (Rosemarin & Ekade 2016).
- Wie groß werden die Flächenverluste durch Bodendegradation und Erosion sein? Durch Erosion gehen weltweit jährlich etwa 12 Mio. ha, das entspricht der Ackerfläche Deutschlands, verloren, was 10-40 schneller ist als die Bildung neuer Böden (Pimentel & Burgess 2013; Rickson et al. 2015). Insgesamt sind bereits etwa 1/3 der globalen Böden durch Erosion, Versalzung, Versauerung, Verschmutzung, Nährstoffentzug, Humusverluste, Kompaktion aber auch be-

züglich ihrer Biodiversität moderat bis stark degradiert (Nachtergaele et al. 2011).

- Wie groß werden die Flächenverluste durch Versiegelung sein? Voraussichtlich wird global bis 2030 eine Fläche, die der vierfachen Größe Deutschlands entspricht, durch Urbanisierung verbraucht werden (Seto et al., 2011), zumeist Ackerland.
- Wie wird sich das Ernährungsverhalten entwickeln bezüglich Fleischkonsum oder Überernährung? 2008 erfolgte auf 40 % der globalen Ackerflächen (1530 Mio. ha) ein Anbau pflanzlicher Nahrungsmittel, dagegen auf 48 % Futtermittelanbau für die Tierernährung (ohne Weideflächen; Raschka et al. 2014). Tierernährung verbraucht viel Fläche und liefert nur sehr wenig Nahrungsmittelkalorien (s. Box 1). Zum Vergleich: Auf nur 4 % der Ackerfläche wurden Energiepflanzen angebaut, auf 8 % stofflich nutzbare Pflanzen.
- Wie verändert sich der Flächenanteil für Energiepflanzenanbau, wenn die Preise für Energie oder Nahrungsmittel variieren? (preisbedingte Angebotsänderungen)
- Welchen Preis bekommt die Bioenergie, wenn sie zur Kompensation kurzfristiger und jahreszeitlicher Stromversorgungsdefizite eingesetzt wird?
- Wie wird sich eine vermehrte stoffliche Nutzung der Biomasse auf Preise und Verfügbarkeit auswirken? Alleine die chemische Industrie in Deutschland würde einen Großteil der Ackerflächen in Deutschland benötigen, um den Bedarf an organischen Rohstoffen zu befriedigen (Bringezu et al. 2009; Carus et al. 2014; meó Carbon Solutions 2010; Piotrowski et al. 2015).
- Wie wirken sich die lokale agrarische und technische Infrastruktur sowie pflanzenbauliche Maßnahmen auf die Erträge aus? (z. B. weniger Ernteverluste; Nährstoffversorgung; Einsatz gentechnisch veränderter Pflanzen)
- Wie beeinflussen geplante Umwelt- und Nachhaltigkeitsstandards die Verfügbarkeit von Flächen für Energiepflanzenanbau, die Art und den Ertrag der angebauten Energiepflanzen?
- Wie stark gehen ökologische Flächenlimitierungen durch Beachtung von Naturschutzaspekten (Erhalt der Artenvielfalt und der landschaftlichen Vielfalt), Wiederbewaldung oder auch durch Anforderungen des Grundwasser- und Gewässerschutzes in die Flächenabschätzungen ein?
- Wie wirkt sich die Akzeptanz der Bevölkerung bezüglich der verschiedenen Energieformen aus?

1.1.3 Versuch einer Abschätzung der globalen Bioenergiepotenziale

Vor diesem komplexen Hintergrund der Fragen soll hier dennoch auf Basis globaler Abschätzungen verschiedener Autoren die eventuelle Verfügbarkeit von pflanzenbasierter Energie erläutert werden. In Abbildung 1-2 sind das global technisch und das globale nachhaltig verfügbare Bioenergiepotential dem globalen Energiebedarf heute und im Jahr 2050 eineinander gegenübergestellt (nach von Dornburg et al. 2008, Bauen et al. 2009). Danach könnten im Jahr 2050 20 bis 80 % des bis dahin gesteigerten globalen Energiebedarfes bereitgestellt werden durch a) Anbau von Energiepflanzen auf normalen wie auch wenig geeigneten marginalen Böden (Pflanzen für die Produktion von Lignozellulose oder Öl) und b) auf Basis von Produktionssteigerungen und Nutzung von Überschuss- und Restbiomassen, die sich auf insgesamt 200 bis 500 Exajoule (EJ) belaufen könnten.

Chum et al. (2011) gehen von 100 bis 300 EJ für das jährliche verfügbare globale nachhaltige Bioenergiepotential aus, Haberl et al. (2013) von nur sehr kleinen, im wenigen Prozentbereich liegenden Beiträgen, die vor allem aus Holz, Restbiomassen und biogenen Abfällen stammen. Dieser Begrenztheit schließen sich auch Jering et al. (2013) an und fordern, dass jenseits der angebotsorientierten Steuerungsansätze die Nutzung von Agrar- und Forstgütern grundlegend auf den Prüfstand gestellt und neu justiert werden müssen, insbesondere auch vor dem Hintergrund der ökologischen und sozioökonomischen Folgen eines neuen „Nachfragesoges“ für Biomasse.

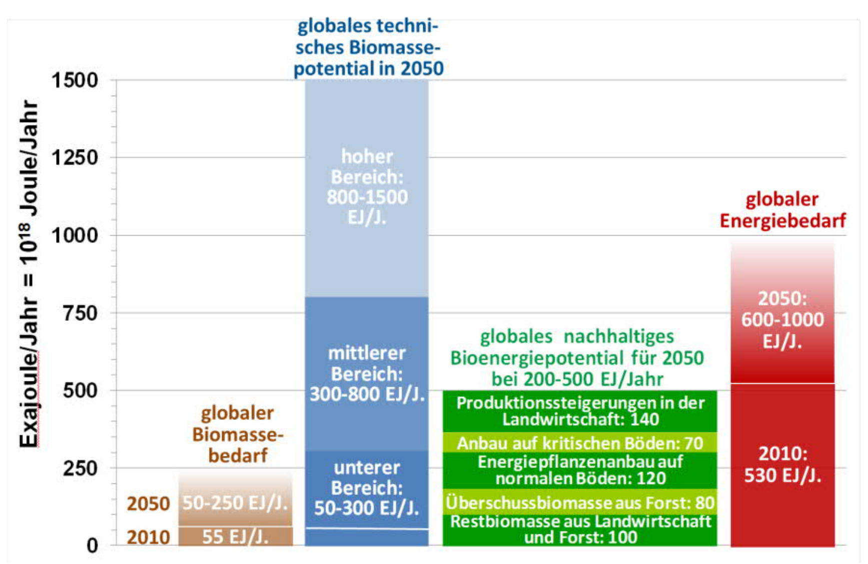


Abbildung 1-2: Abschätzung der technischen Biomassepotentiale, des Biomassebedarfes sowie der Bioenergiepotentiale und des Energiebedarfes in Exajoule (1 EJ = 10^{18} Joules) pro Jahr auf globaler Ebene (nach Daten von Dornburg et al. 2008, Bauen et al. 2009 sowie neuere Daten). In einigen neueren Studien werden die Biomassepotentiale für 2050 meist deutlich niedriger eingeschätzt (s. Text).

In Tabelle 1-1 sind in den beiden linken Spalten Abschätzungen unter business-as-usual-Annahmen (weiter so wie bisher) für notwendige Flächenexpansionen des Ackerlandes bis 2050 angegeben (320-849 Mio. Hektar), um alle wichtigen Ansprüche befriedigen zu können. In den beiden rechten Spalten sind mögliche Einsparmöglichkeiten beim Flächverbrauch zusammengestellt (161-319 Mio. ha), welche aber nicht ausreichen, die Flächenexpansion zu kompensieren (UNEP 2014). Unter Einrechnung der Kompensationen würde gegenüber den 1530 Mio. ha Ackerfläche heute der Flächenbedarf um 123-496 Mio. ha anwachsen, also gerundet auf etwa 1600-2000 Milliarden ha. Um aber im sicheren Bereich zu bleiben, sollten nach Angaben der UNEP (2014) die globalen Ackerflächen bis 2050 insgesamt 1640 Mio. ha nicht überschreiten, also maximal nur um 110 Mio. ha anwachsen. Der große Flächenmehrbedarf liegt erwartungsgemäß bei der Ernährung (71-300 Mio. ha). Ähnlich groß ist erschreckenderweise die notwendige Kompensation von Flächenverlusten durch Versiegelung und Bodendegradation (197-354 Mio. ha). Für Energiepflanzenzwecke sind nur kleine Flächenanteile reserviert (48-80 Mio. ha entsprechend etwa 3-5 % der globalen ackerbaulichen Fläche). Hier wird im Gegensatz zu den Daten in Abb. 1-2 sehr deutlich, wie gering die Spielräume für Energiepflanzenanbauflächen in Zukunft sind.

Tabelle 1-1: Expansion des globalen Ackerlandes (in Mio. Hektar) bis 2050 unter business-as-usual (BAU)-Bedingungen mit Schätzwertbereichen und Einsparpotenzialen; Basisjahr 2005 (nach UNEP 2014)

Expansion	Bereich	Einsparungen	Bereich
Nahrungsmittelversorgung	71 - 300	ausgewogene Ernährung und Reduktion der Nahrungsmittelverluste und -abfälle	96 - 135
Biokraftstoffversorgung	48 - 80	Halbierung der Biokraftstoffproduktion	24 - 40
Versorgung mit Biomaterialien	4 -115	Limitierung des Bedarfs an Biomaterialien	0 - 57
Direkte Expansion	**123 - 495**	**Direkte Einsparungen***	**120 - 232**
Kompensation für Versiegelung	107 - 129	verbesserte Flächennutzung, Raumplanung	11 - 13
Kompensation für Bodendegradation	90 - 225	Regeneration degradierter Böden durch Investitionen	30 - 74
Indirekte Expansion	**197 - 354**	**Indirekte Einsparungen**	**41 - 87**
Gesamtexpansion	**320 - 849**	**Gesamteinsparungen**	**161 - 319**

*Es fehlen mögliche Einsparungen durch Kaskadennutzung und durch Reststoffe.

Hintergründe und Schwierigkeiten bei solchen Abschätzungen sollen erläutert werden auf Basis der Berechnungen der Arbeitsgruppe Zeddies et al. (2012, 2014), welche differenziert die technischen Potentiale für den Energiepflanzenanbau bis in das Jahr 2050 ableiten. Die Autoren gehen ebenfalls von einem Referenzszena-

rio BAU (business as usual) aus, das auf einer Fortschreibung der jetzigen Trends in den einzelnen Ländern beruht und bei dem die Ernährung der Menschheit gesichert sein soll. Hiernach sind die globalen technischen Potentiale für Energiepflanzenanbau erheblich höher und liegen bei erstaunlichen 200 - 300 Mio. Hektar (ha), also bei grob 1/6 der globalen Ackerfläche. Diese Flächen lägen vorwiegend in einem Teil Europas, in Nord- und Südamerika, kaum dagegen in Afrika, Asien und Mittelamerika. Würde aber allen Menschen die Getreideernte eines durchschnittlichen Europäers zugestanden, ständen innerhalb weniger Jahrzehnte keine Flächen für Energiepflanzenanbau zur Verfügung. Ähnliches gilt, wenn 10 % der Ackerflächen für Naturschutzzwecke hergenommen oder schärfere Nachhaltigkeitskriterien eingeführt würden oder wenn die erwarteten globalen ackerpflanzlichen Ertragszuwachsraten sänken. Ein Schlüssel für die sehr positive Einschätzung des Energiepflanzenanbaus in 2050 durch die Arbeitsgruppe Zeddies sind Produktivitäts- und Effizienzsteigerungen, aber auch die In-Kulturnahme von Brachflächen. Insgesamt liegt wiederum der zusätzliche globale Flächenbedarf deutlich über dem sicheren Bereich der UNEP (2014) für 2050 von 1640 Mio. ha, was ja nur etwa 7 % Flächenzugewinn bedeutet. Zeddies et al. (2012) gehen leider auch aus Gründen der Komplexität bzw. unzureichender Prognosemöglichkeiten nur indirekt oder nicht auf eine Minderung der Verfügbarkeit von landwirtschaftlichen Böden bzw. der Erträge ein, was teilweise bereits oben beschrieben wurde (s. auch Foley et al. 2011; Nachtergale et al. 2011; West et al. 2014; Amundson et al. 2015) und hier nochmals erwähnt und ergänzt wird:

- Der Verlust von landwirtschaftlichen Flächen durch Degradation physikalischer Art (Erosion; Bebauung) und chemischer Art (Kontamination, Versalzung etc.), aber auch durch Versieglung der Flächen.
- Der generell zunehmende Abbau der organischen Substanz und damit einhergehende Verschlechterung der Bodenqualität.
- Die eventuell abnehmende Verfügbarkeit der Düngemittel Kalium und Phosphor generell und im jeweiligen Land, eine Basis für den Erhalt bzw. für die Schaffung fruchtbarer Böden.
- Einfluss des Klimawandels auf die Verteilung fruchtbarer Böden in verschiedenen Bereichen der Welt.
- Zusätzlicher Bedarf landwirtschaftlicher Flächen für Anbau von Pflanzen zwecks stofflicher Nutzungen.
- Steigerung des globalen Fleischkonsums mit seiner starken Flächen-Inanspruchnahme (s. Box).

Es wird also eng bei stark steigender Weltbevölkerung, zunehmender Bodendegradation und unter Einfluss des Klimawandels.

1.1.4 Versuch einer Abschätzung der künftigen Situation der Bioenergie in Deutschland

Zeddies et al. (2012, 2014) beleuchten auch die Situation in Deutschland. Nach deren Studien könnte bereits jetzt die Fläche für den Anbau nachwachsender Rohstoffe (Nawaro) von 2,47 Mio. ha im Jahr 2015 (FNR 2016a) auf theoretisch 3,6 Mio. ha gesteigert werden bei Gewährleistung ausreichender Nahrungsmittelversorgung. Inländisch bereitgestellte Nahrungsmittel hätten im Jahr 2050 bei gegebenen Agrarimporten und -exporten einen Flächenanspruch von nur noch 6,8 Mio. ha. 2050 ständen für den Nawarobereich theoretisch 7,5 Mio. ha zur Verfügung, selbst wenn zusätzlich 2,4 Mio. ha für Nahrungsmittelexporte eingesetzt würden, erstaunlich große Zahlen vor dem Hintergrund von 16,7 Mio. ha landwirtschaftlich genutzter Fläche in 2014 (11,87 Mio. ha Ackerland und 4,65 Mio. ha Dauergrünland; Statistisches Bundesamt 2015b). Gründe für die günstigen Aussichten sind nach Zeddies et al. (2012) die um etwa 10 % sinkende Bevölkerungszahl, Abnahme des Pro-Kopf-Verbrauchs sowie Ertrags- und Effizienzsteigerungen. Entsprechende Hochrechnungen für die EU-27-Staaten belaufen sich auf optimistische 32 Mio. ha für den Anbau von Nicht-Nahrungsmittelpflanzen im Jahr 2050 (Zeddies et al. 2012, 2014). Bei den Betrachtungen wird nicht hinreichend berücksichtigt, dass bereits heute erhebliche Ackerflächen im Ausland belegt sind wie z.B. Sojaanbaufläche für Tierernährung (s. Box 1).

Die FNR (2016a, b) argumentiert mit kürzlich überarbeiteten Zahlen wie folgt: Im Jahr 2015 lieferte die Bioenergie (inkl. biogene Abfälle) 8.1 % des Primärenergieverbrauchs (PEV) von 13306 PJ in Deutschland. Unter der Annahme, dass letzterer auf 6891 PJ sinken wird, können bis 2050 1819 PJ (26 %) des PEVs unter Ausnutzung aller Biomassepotentiale befriedigt werden. 54 % der Bioenergie werden aus der Landwirtschaft, 38 % aus Holz aus Durchforstung, Kronenresten etc. und 7 % aus Abfällen bezogen. Selbst unter Einbezug naturschutzfachlicher Restriktionen kann die agrarische Anbaufläche für Energiepflanzen von jetzt 2,2 Mio. ha auf 4 Mio. ha bis 2050 gesteigert werden, ermöglicht durch den demografischen Wandel, agrarpolitische Änderungen und Ertragssteigerungen. Die Hauptmenge der Bioenergie wird durch Energiepflanzen erzeugt, gefolgt durch Strohnutzung, Mist und Gülle. Die höchsten Zuwachsraten sind neben dem gesteigerten Energiepflanzenanbau zu erwarten durch die starke Steigerung bei der Verwendung von Stroh, Gülle und Mist sowie von Wald- und Schwachholz (kein Energieholz) und Landschaftspflegegut).

Für den Umstieg in die erneuerbaren Energien ist die Bioenergie trotz ihres begrenzten aber eventuell noch steigerbaren Potentials eine wichtige Stütze. Deren Ausmaß und Bedeutung wird für den Strom-, Wärme- und Mobilitätssektor in Deutschland extrem unterschiedlich eingeschätzt, wie eine zusammenfassende Metaanalyse der Agentur für Erneuerbare Energien (AEE 2015) auf Basis von 12 publizierten Studien zeigt: Die beiden Hauptprognosen der Studien sind: a) Schwerpunkt der Bioenergie zur Stromerzeugung in flexiblen Anlagen mit Kraft-

Wärme-Kopplung und Ausgleich der fluktuierenden Stromproduktion aus Windkraft- und Solaranlagen vs. b) Schwerpunkt auf den Biokraftstoffen vor allem für schwere Nutzfahrzeuge und im Flug- und Schiffsverkehr, was aber stark vom Ölpreis abhängig sein dürfte. Nach fast allen ausgewerteten Studien wird die heute durch Holzenergie geprägte Dominanz des Wärmesektors langsam zurückgehen.

Das Fraunhofer IWES (2015) hat in einer Mitteilung unter dem Titel „Klimaschutzziele nur mit Wärme durch Strom aus erneuerbaren Energien erreichbar" aufgezeigt, wie 2050 die energetischen Bereiche Strom, Wärme und Verkehr miteinander gekoppelt und Stromüberschüsse in ein Gesamtkonzept integriert werden sollten. Die künftige Rolle der Bioenergie in Deutschland in Bezug auf die Wärmeversorgung wird relativiert. Es wird für 2050 von einer Fläche zum Anbau nachwachsender Rohstoffe von 2 Mio. ha ausgegangen. Der Einsatz fester Biomasse sollte langfristig auf dezentrale Feuerungsanlagen (Pellet-, Holzhackschnitzel- und Scheitholz-Heizungen), auf ineffiziente Bestandsgebäuden mit hohem Wärmebedarf, auf Siedlungen mit geringer Wärmedichte (ländliche Umgebung/Stadtrand) sowie auf Industrie mit hohen Prozesstemperaturen beschränkt werden. Strom aus erneuerbaren Energieträgern (vor allem Photovoltaik und Wind) wird in Kombination mit Effizienzmaßnahmen (z.B. Dämmung, Wärmepumpen) und ausgeklügelten Wärmespeichersystemen zum wichtigsten Wärmelieferanten werden, wobei Gebäude selber als Wärmespeicher fungieren können. In einer inhaltlich vergleichbaren Metaanalyse der AEE (2016a), basierend auf 25 verschiedenen Studien mit unterschiedlichen Energieszenarien, wird zusammenfassend angenommen, dass auf Grund der begrenzten Potentiale von erneuerbaren Wärmetechnologien und Biomasse der Strom aus Wind- und Solaranlagen zunehmend auch die „Primärenergie" für den Wärme- und Verkehrssektor liefern wird. Das hierbei notwendige hohe Maß an Flexibilität kann durch Netzausbau, Stromaustausch, flexible Biogas- und KWK-Anlagen und Ausbau von Speichertechnologien erreicht werden.

1.1.5 Möglichkeiten zur Steigerung der globalen bzw. lokalen Flächenverfügbarkeit zum Anbau von Energiepflanzen

In der anschließenden Box werden Argumente zusammengeführt, welche Alternativen es zur konventionellen Einschätzung der Flächenverfügbarkeit gibt. Hintergrund für diese Einschätzung sind Gedanken und Fakten zur Teller-Tank-Diskussion, zur Über- und Unterernährung und zu Nahrungsmittelverlusten bei Anbau, Ernte, Lagerung, Transport, Handel und Verbrauch.

Box: „Die Teller-Tank-Diskussion“ oder „Die Trog-Teller-Diskussion“ oder „Die Trog-Bioenergie-Diskussion“

Hans Ruppert

Ein häufig kritischer Punkt bei Bioenergie-Debatten ist die kontroverse Teller-Tank-Diskussion, die meist vor dem Hintergrund geführt wird, dass der Energiepflanzenanbau mit Flächen für die Nahrungsmittelproduktion konkurriert. In diese Diskussion müssen zusätzlich die Frage nach der Nachhaltigkeit des Konsums tierischer Lebensmittel und deren Gesundheits-und ökologische Auswirkungen einfließen.

Globale Aspekte der Produktion tierischer Lebensmittel

Blickwinkel *Flächenbedarf:* Nur selten wird bei diesen Diskussionen beachtet, dass 2008 48 % der globalen Ackerflächen (730 von 1530 Mio. ha Ackerfläche) zum Anbau von Planzen für die Tierernährung benutzt wurden (Raschka et al. 2014), häufig in Form von Monokulturen. Nur 40 % der Ackerflächen dienten dem Anbau von pflanzlichen Nahrungsmitteln, 8 % für den Anbau stofflich nutzbarer Pflanzen und 4 % für Energiepflanzen.

Die globale Fleischproduktion hat sich von 1962 bis 2012 vervierfacht, die Milchproduktion mehr als verdoppelt und wird weiterwachsen (WBA 2015). Die OECD-FAO (2015) geht von einer Zunahme der Fleischproduktion bis 2024 von 1,4 % pro Jahr aus. In diesen Zahlen nicht berücksichtigt ist die für die Tierernährung verwendete Biomasse von etwa 3470 Mio. ha Weideland (Raschka et al. 2014). Dieses steht normalerweise aber nicht in Konkurrenz zur agrarisch genutzten Fläche und vermag sogar die Ernährungssituation in entsprechenden Gebieten verbessern (Foley et al. 2011; Noleppa & Cartsburg 2015a).

Blickwinkel *Tonnen geerntete Biomasse:* Aus dem Blickwinkel der globalen Biomassenachfrage ergeben sich etwas andere, aber vom Trend her ähnliche Zahlen zur Teller-Tank-Diskussion. Von 12,14 Mrd. t nachgefragter Biomasse (incl. Holz) im Jahr 2011 wurden 7,06 Mrd. t (58,2 %; einschließlich der Weidebiomasse von 3,70 Mrd. t) als Futtermittel verwendet, während der Bedarf an pflanzlichen Lebensmitteln nur 1,70 Mrd. t (14,0 %) ausmachte (Piotrowski et al. 2015). Der Rest umfasst mit 2,12 Mrd t (17,5 %) die Bioenergie (vorwiegend Holz, nur 0,14 Mrd. t Biokraftstoffe) und mit 1,26 Mrd. t (10,4 %) die stoffliche genutzte Biomasse. Zieht man die Weidebiomasse von 3,70 Mrd. t ab, so gehen 3,36 Mrd. t der agrarisch erzeugten Biomasse in die tierischeProduktion, und nur 1,70 Mrd. t dienen der pflanzlichen Nahrungsmittelproduktion. Es wird also etwa doppelt so viel Biomasse für die Ernährung von Vieh als für die direkte pflanzliche Ernährung von Menschen verwendet.

Blickwinkel *Kalorien:* Die intensive Fleischproduktion mit Hilfe von Ackerpflanzen ist von der generellen Kalorienproduktion her gesehen extrem ineffizient: Cassidy et al. (2013) rechneten aus, dass 55 % der in den wichtigsten 41 weltweit angebauten Nahrungsmittelpflanzen steckenden Kalorien direkt in die menschliche

Ernährung eingehen. 36 % der Kalorien werden für die Produktion tierischer Nahrungsmittel verbraucht. Diese liefern letzlich aber nur 4,0 % des menschlichen Kalorienbedarfs, ein Verlust von 89 %. Hintergrund ist, dass die auf eine bestimmte Fläche bezogene Ausbeute essbarer fleischlicher Kalorien je nach Tierart und Futterzusammensetzung erheblich geringer ist als wenn die Pflanzen direkt für die Ernährung verwendet würden. Für den Konsum tierisch-basierter Lebensmittel in Deutschland (Milch, Eier, Fleisch) werden für eine Kilokalorie Nährwert etwa 4,8-fach mehr Fläche benötigt als für eine Kilokalorie pflanzlicher Nahrungsmittel (Busch 2009 in Bringezu et al. 2009).

Blickwinkel *Zukunft:* Erb et al. (2016) rechneten 500 Szenarien durch, ob im Jahr 2050 der Nahrungsmittelbedarf ohne größere Ausdehnung der globalen Ackerflächen ohne weitere Abholzung von Wäldern, eine unserer wichtigen Treibhausgassenken, gedeckt werden kann. Dies ist in 60 % der Szenarien möglich, in denen die Menschen den Fleischkonsum erheblich zurückfahren. Bei vegetarischer und veganer Ernährung zeigen 94 % der Szenarien, dass weitere Rodungen nicht nötig sind, bei fleischorientierter Ernährung dagegen nur noch 15 % der Szenarien. Würde also die „Veredlung" pflanzlicher Biomasse zu tierischen Produkten entgegen dem global prognostizierten Wachstumstrend eher zurückgefahren werden, ständen pro Flächeneinheit erheblich mehr Nahrungsmittelkalorien zur Verfügung. Cassidy et al. (2013) schätzen, dass vier Milliarden Menschen zusätzlich ernährt werden könnten, wenn die auf dem Ackerland erzeugten Nahrungsmittelpflanzen direkt und nicht auf dem extrem uneffektiven Wege über tierische Produkte konsumiert würden (tierische Produkte von Weideflächen ausgenommen). Alexander et al. (2016) machen die Fleischproblematik durch einen anderen Vergleich deutlich: Wenn die Menschen sich global wie die Inder ernähren würden, bräuchten wir heute 55 % weniger landwirtschaftliche Fläche; bei einer mittleren Ernährungsweise wie in den USA hingegen würden 178 % mehr Fläche benötigt.

Ein Teil der bei fleischärmerer Ernährung freiwerdenden Flächen würde also zur globalen Nahrungsmittelsicherung beitragen und könnte deutlich mehr Menschen ernähren, als 2050 auf dem Globus leben werden (Schätzung bei 9,6 Mrd.). Die freiwerdenden Flächen könnten teilweise auch für den Anbau von Pflanzen für die wachsende energetische oder stoffliche Nutzung verwendet werden. Die größte Flächenfreisetzung würde in den entwickelten Ländern erfolgen, da 2012-2014 in den entwickelten Ländern 12,4 % der Kalorien über Fleisch aufgenommen wurden, in den am wenigsten entwickelten Ländern nur 3,4 % (OECD-FAO 2015). Aspekte der Proteinversorgung und der Erzeugung von Milch- und Eierprodukten werden hier nicht vertieft (mehr Info unter Meier et al. 2014; WBA 2015).

Zur Situation in Deutschland

2013 gab es in Deutschland 220 Mio. Nutztiere, dominiert von Geflügel mit 177 Mio. Tieren. Die durchschnittliche Menge an verzehrtem Fleisch (ohne Knochen, Haut und Schlachtverluste) betrug 2008 etwa 60 kg pro Einwohner und Jahr und

könnte bis 2030 auf 53 kg sinken (WBA 2015). Der Futtermittelverbrauch in Deutschland belief sich 2013 auf 135,5 Mio. t, der importierte Futtermittelanteil betrug 16 Mio. t, also 11,9 % des Futtermittelverbrauchs, wobei Kraftfutter auf Sojabasis bei weitem dominierte (Statistisches Bundesamt 2015a; Noleppa & Cartsburg 2015a; s. weiter unten).

Blickwinkel *Fläche:* Die landwirtschaftliche Fläche in Deutschland betrug 2013 16,7 Mio. ha, davon etwa 30 % Grünland und 70 % Ackerland (Statistisches Bundesamt 2015b). Etwa 60 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche (das Grünland nahezu komplett und 46 % des Ackerlandes) in Deutschland dienen momentan der Erzeugung von Futtermitteln (WBA 2015; Statistisches Bundesamt 2015a). Zur Herstellung der Futtermittel wurden somit im Inland 9,8 Mio. ha landwirtschaftliche Fläche belegt; hinzu kommen 3,9 Mio. ha im Ausland, zusammen also 13,7 Mio. ha. Von dieser Fläche sind allerdings durch den Export tierischer Produkte von Deutschland ins Ausland 5,8 Mio. ha abzuziehen, wovon 4,0 Mio. ha aus heimischen Flächen und 1,8 Mio. ha von Importflächen für Futtermittel stammen. Zusätzlich zu den Futtermittelbilanzen müssen auch importierte Fertigerzeugnisse tierischen Ursprungs in die Bilanzierung einbezogen werden (Statistisches Bundesamt 2015a), die von einer errechneten Fläche von 4,8 Mio. ha stammen. Zählt man die Flächenbelegung aus dem Import von Futtermittel und tierischen Erzeugnissen zusammen, stehen 8,7 Mio. ha importierter Fläche nur insgesamt 5,8 Mio. ha exportierte Fläche gegenüber, ein Defizit von 2,9 Mio. ha (nach Daten des Statistischen Bundesamtes 2015a). Der Export erfolgte bevorzugt in Länder mit hohem oder wachsendem Konsum tierischer Produkte. Verrechnet man allerdings die über importierte Futtermittel (3,9 Mio ha) und tierische Produkte (4,8 Mio ha) verbrauchte externe Fläche mit der aus Deutschland wieder exportierten überseeischen Fläche (1,8 Mio ha), so ergibt sich in Deutschland ein Verbrauch von 3,9 + 4,8 - 1,8 = 6,9 Mio. ha ausländischer Fläche durch den Konsum tierischer Produkte. Es wurde summarisch also erheblich mehr ausländische Fläche nach Deutschland importiert als von Deutschland aus exportiert.

Noleppa & Cartsburg (2015a) errechneten, dass 72 % des Flächenabdrucks für Nahrungsmittel in Deutschland von insgesamt 2397 m² pro Kopf auf das Konto tierischer Produkte geht: 1019 m² werden für die Produktion von Fleischprodukten, 602 m² für Milchprodukte, 84 m² für Eier und 12 m² für Fischerzeugnisse verbraucht. Der kleine Rest von nur 674 m² (28 %) geht in die Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel.

Blickwinkel *Kohlenstoffmengen bei der Nahrungsmittelproduktion:* Nach Haberl et al. (2013) wurden in Deutschland 2010 von den jährlich etwa 90 Mio. Tonnen Kohlenstoff (Elementsymbol C), die geerntet oder abgeweidet werden (20 Mio. t C in Stroh unberücksichtigt), nur 10 Mio. t C direkt als pflanzliche Nahrung verwendet, dagegen 53 Mio. t C als Futtermittel (davon 20 Mio. t von den Weiden). 14 Mio. t C wurden als Industrie- und Brennholz und 10 Mio. t für sonstige Zwecke verbraucht. Deutschland deckt zusätzlich etwa 37 % seines Bedarfes von

Biomasse und Biomasseprodukten durch Importe ab, um seinen gegenwärtigen Verbrauch an Biomasse zu befriedigen (Haberl et al. 2013). Den größten Anteil dieser Importe machten 2015 mit etwa 3,7 Mio. t Sojabohnen pro Jahr und 2,9 Mio t Sojaschrot aus (OVID 2016), von denen etwa 4/5 als Futtermittel Verwendung finden. Exporte sind unberücksichtigt. Die Sojaimportquote wäre noch erheblich höher, würden nicht eiweisreiche Futtermittel als Koppelprodukt aus der einheimischen Biokraftstoffproduktion in der Tierernährung eingesetzt. Die etwa 3,4 Mio. t Futtermittel aus Koppelprodukten in Deutschland ersetzten 2015 etwa 2,5 Mio. t Soja (AEE 2016b). In die EU-28 wurden 2015 8,2 Mio. Sojaöl aus Südamerika und 6,1 Mio. aus Nordamerika importiert, Sojaschrotimporte erfolgten mit 19,7Mio. t fast ausschließlich aus Südamerika (OVID 2016).

Blickwinkel *Flächenimporte und ökologische Auswirkungen auf die Exportländer:* Noleppa & Cartsburg (2015a) schätzen für 2011-2013 den deutschen Nettoimport landwirtschaftlicher Ackerfläche allein für Soja auf 2,24 Mio. ha (davon 1,65 Mio. ha in Brasilien, Argentinien und Paraguay), wovon nur 0,29 Mio ha wieder exportiert wurden. Für die EU betrug die externe Flächeninanspruchnahme für Sojaprodukte 2008 bis 2010 um 15 Mio. ha (von Witzke et al. 2011). Allerdings stammt ein Teil des Sojaschrotes aus der Produktion von Sojaöl, so dass sich die Flächeninanspruchnahme verringert. Nur noch ein Fünftel des Eiweißfutters für die Tierproduktion in der EU stammt aus der Eigenproduktion der EU (LMC International, 2009). In den Exportländern in Südamerika führt der Sojaanbau zu einer Umnutzung bisheriger Agrarflächen. Der Anbau der bisher dort angebauten Produkte wird teilweise kompensiert durch Anbau in anderen Bereichen wie z.B. in noch vorhandenen natürlichen Savannengebieten oder in tropischen bis subtropischen Waldgebieten. Es kann somit zu einem indirekten Landnutzungswandel kommen. Negative Folgen sind z.B. Abnahme der Biodiversität (ökologische Nachhaltigkeit), vermehrte Bodenerosion und Freisetzung von CO_2, Einrichtung von Großfarmen zu Ungunsten lokaler Kleinfarmer, Ausbreitung von Monokulturen, Versorgungsengpässe mit Nahrungsmitteln etc. (von Witzke et al. 2011; Noleppa & Cartsburg 2015a; WBA 2015). Diese Aspekte müssen bei der Inanspruchnahme ausländischer Flächen dringend Beachtung finden.

Der Druck auf die Wälder durch den Konsum tierischer Lebensmittel soll mit mit folgenden Zahlen verdeutlicht werden: Global gingen zwischen 1990 bis 2008 239 Mio. ha an Wäldfläche ganz vorwiegend in den tropisch/subtropischen Gebieten verloren (EU 2013). Aus der Treibhausgassenke Wald wurde in den betreffenden Gebieten eine Treibhausgasquelle. 59 Mio. ha der Waldfläche wurden in Weideland, 14 Mio. ha in Flächen für Futtermittel umgewandelt. Etwa 5 Mio. ha dieser Flächen dienen für Exporte von Futtermitteln (insbesondere Soja) oder tierischer Produkte in die EU27 (EU 2013).

Die Autoren des WBA (2015) weisen darauf hin, dass die virtuellen Flächenimporte auch dann stattfinden, wenn wir das Fleisch nicht in Deutschland, sondern in anderen Ländern produzieren und dann einführen würden. Weiterhin können auch die aus dem hohen Konsum tierischer Produkte resultierenden virtuellen

Flächenimporte durch den Anbau von heimischen Futtermitteln nicht entschärft werden, weil durch den Anbau von zusätzlichen Leguminosen für die Tierfütterung andere Anbauprodukte verdrängt würden, welche dann wiederum importiert werden müssten. Wesentliche Reduktionen der Flächenimporte wie auch Einsparungen heimischer landwirtschaftlicher Fläche können nur durch Konsumänderungen über eine Reduktion des Verbrauchs tierischer Lebensmittel erreicht werden (Meier et al. 2014; WBA 2015). Änderungen des Konsumstils sollten über nachvollziehbare Informationen für den Verbraucher und Ernährungsbildung (am besten bereits beginnend in Kindergarten und Schule) erreicht werden, ist also eher längerfristig zu erwarten. Wegen ihres erheblichen Beitrages zur Entspannung der globalen Biomassebilanz sowie zur Entschärfung von Gesundheits- und Umweltproblemfeldern (s. unten) und Stärkung der Nahrungsmittelsicherheit sollten diese Maßnahmen zur Stimulierung eines nachhaltigeren Konsums verstärkt entwickelt und eingesetzt werden (Transformation zu „besser und weniger" bei tierischen Produkten; WBA 2015).

Zwischenresümee zur Teller-Tank-Diskussion

Zusammengefasst sollte die eigentliche Diskussion somit weniger auf eine Teller-Tank-Konkurrenz fixiert sein, sondern auf die Konkurrenz Trog-Tank oder exakter Trog-Bioenergie und in Regionen mit Nahrungsmittelengpässen auch die Konkurrenz Trog-Teller zum Inhalt haben. Motivation für die meist negativen Ausführungen zur Produktion tierischer Nahrungsmittel ist nicht das generelle Abschaffen von Fleisch, Milch und Eiern, sondern eine Verschiebung zu einer von den Inhaltsstoffen ausgewogenen Ernährung mit deutlich mehr pflanzlichen Anteilen.

Zu dieser Diskussion sollten sich noch die im folgenden beschriebenen Aspekte gesellen wie z.B. der Kontext von Fleischgenuss und Gesundheit, Fleischproduktion und Umwelt.

Auswirkungen der Produktion und des Konsums tierischer Lebensmittel in Deutschland

Ein oft vergessenes Faktum ist, dass 87 % des angebauten und damit importierten und verfütterten Sojas genverändert sind und somit in unsere Ernährung eingehen (Ovid 2016). Durch Sojaimporte wird die heutige intensive Tierhaltung wie im Nordwesten Niedersachsens erst möglich. Sie legen die Grundlage für die schädlichen lokalen und regionalen Nährstoffüberschüsse, Ammoniak- und Treibhausgasemissionen bei uns in Deutschland.

Der hohe Konsum von Fleisch und Wurstwaren in den Industrieländern belastet die Gesundheit (Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Diabetes Typ 2) (McMichael et al. 2007; WBA 2015) und damit auch die Krankenkassen. Gesundheitsheitsexperten (DGE 2013) schlagen - orientiert am Leitbild einer vollwertigen Ernährung - vor, den Konsum von Fleisch und Fleischerzeugnissen in Deutschland zu verringern auf etwa 300 bis 600 g pro Woche (als auf etwa 15 bis 30 kg pro Jahr), was mehr als einer Halbierung des jetzigen Konsums entspricht. Bei Milch- und Milch-

produkten empfiehlt die DGE (2013) einen moderaten Konsum, der von den meisten Deutschen allerdings unterschritten wird (Watzl 2013 in WBA 2015). In der folgenden Übersicht sind einige zusätzliche Umweltaspekte aufgelistet, die ebenfalls eine Reduzierung des Konsums tierischer Lebensmittel dringlich nahelegen (s. auch Ruppert et al. 2013):

- Landnutzungswandel durch den hohen Bedarf an Flächen für Futtermittelpflanzen, wodurch bei Abholzung oder Grünlandumnutzung CO_2 freigesetzt und die Biodiversität verringert wird (von Witzke et al. 2011; Noleppa & Cartsburg 2015a).
- Emissionen der Treibhausgase CO_2, Methan und Lachgas aus den Tieren und aus deren Gülle, teilweise nach deren Aufbringung. Bei den globalen Treibhausgasemissionen gehen 19 bis 29 % auf Nahrungsmittelsysteme zurück (Vermeulen et al. 2012), ein gehöriger Teil davon auf die Viehhaltung. In Deutschland werden pro Einwohner 1345 kg (68 %) von insgesamt 1991 kg jährlicher CO_2-Äquivalente aus der Landwirtschaft der Produktion tierischer Lebensmittel zugeschrieben (Noleppa 2012; Noleppa & Cartsburg 2015a).
- Überdüngung von Feldern mit Phosphor und Stickstoff insbesondere in Regionen mit hoher Tierdichte. Der Dunganfall aus der Tierhaltung in Niedersachsen betrug 2014/15 47,6 Mio. t, davon 38,8 Mio. t Gülle und 8,8 Mio. Festmist mit insgesamt 357.000 t N und 139.000 t P_2O_5 (LWK Niedersachsen 2016). Insbesondere im Nordwesten Niedersachsens (Weser-Ems-Gebiet) überschreitet der Anfall organischer Dünger aus der Tierhaltung die Grenzen der einzelbetrieblichen Ausbringungsvorhaben der Düngemittelverordnung erheblich und muss aufwendig exportiert werden.
- Nitrat und Phosphat aus der Gülle gelangen durch Abspülung und Versickerung in Oberflächengewässer (Eutrophierungsgefahr).
- Nitrat (NO_3^-) und Ammoniak (NH_3) können das Grundwasser kontaminieren (bei Trinkwassergewinnung gesundheitlich problematisch). Die Nitratkonzentration im Sickerwasser in den Landkreisen des Weser-Ems-Gebietes liegt gemittelt zwischen 100-150 mg pro l Wasser und in den mehreren anderen Landkreisen Niedersachsens zwischen 50-100 mg (LWK Niedersachsen 2016). Trinkwasser sollte unter 50 mg/l Nitrat enthalten; der natürliche Hintergrundwert liegt normalerweise deutlich unter 5 mg/l. Um auf 50 mg/l Nitrat zu gelangen, beträgt der errechnete N-Minderungsbedarf in der Tierhaltung für Niedersachsen 81.000 t pro Jahr. Auf dem Weg zum Grundwasser wird zwar ein Teil des Stickstoffs durch Denitrifikation abbgebaut, dennoch sind besonders in Gebieten mit starker Gülleeinbringung und sandigen Böden die Nitratgehalte des Grundwassers erhöht (WBA 2015), oft über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung.
- Freisetzung von Tierarzneimitteln (z.B. Hormone und Antibiotika) in die Böden und ins Oberflächen- und Grundwasser. Rückstände von antimikrobiell

wirkenden Substanzen können gegebenenfalls von Pflanzen aufgenommen werden, die dann als Lebens- oder Futtermittel genutzt werden, sie können die Bodenflora beeinflussen und hier zu einer Resistenzbildung beitragen (WBA 2015) und sind vereinzelt bereits im Grund- und Oberflächenwasser nachweisbar (Hannapel et al. 2014).

- Freisetzung von NH_3 in die Atmosphäre und Umwandlung in das Treibhausgas Lachgas (N_2O) oder Salpetersäure (Saurer Regen). Zusätzlich ist NH_3 eine Vorläufersubstanz der Feinstaubbildung in der Luft. In Niedersachsen gehen aus der Tierhaltung durch Stall- und Lagerungsverluste aus der Tierhaltung 91300 t und über Ausbringungsverluste 50600 t Stickstoff als NH_3 in die Atmosphäre (LWK Niedersachsen 2016). Die NH_3-Emissionsdichte beträgt in Gebieten mit wenig Tierhaltung in Deutschland unter 4 kg pro ha und Jahr, kann aber in Gebieten mit hoher Tierdichte wie Nordwest-Niedersachsen 100 kg überschreiten (WBA 2015).
- Einerseits ist die Tierhaltung in Verbindung mit extensiven Grünlandnutzungsformen Voraussetzung für Biodiversität in Agrarlandschaften (was allerdings durch Nutzungsaufgabe des Grünlands in vielen Regionen Deutschlands bedroht ist). Andererseits verursacht die Landwirtschaft durch Intensivierung im Landbau (auch mit Futtermittelpflanzen) und der Tierhaltung sowie durch Abnahme der Kulturartendiversität Verluste an biologischer Vielfalt. NH_3-Einträge aus der Tierhaltung gefährden die Erhaltung von nährstoffarmen Ökosystemen (WBA 2015).
- Problematische Aspekte der Tiergesundheit bei hoher Tierdichte: Ertragsoptimierte Ernährung der Tiere, enge Haltung ohne Freiraum und natürlichem Licht, Medikamenteneinsatz etc. (WBA 2015) → Frage der Ethik. Hier spielt das Mensch-Tier-Verhältnis, wie wir also mit dem Lebewesen Tier umgehen, eine herausragende Rolle. Der Wissenschaftliche Beirat Agrarpolitik wies 2015 in einem Gutachten an das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft darauf hin, dass es bei der Nutztierhaltung zwar große Fortschritte bei der Ressourceneffizienz gegeben hat, gleichzeitig aber erhebliche Defizite im Bereich Tierschutz/Tierwohl und auch im Umwelt- und Verbraucherschutz vorhanden sind (WBA 2015). Der Beirat sieht die bisherigen Haltungsbedingungen eines Großteils der Nutztiere als nicht zukunftsfähig und hat Leitlinien und Empfehlungen für eine gesellschaftlich akzeptierte Nutztierhaltung entwickelt sowie einen intensiven Diskurs zwischen Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Politik unter Einbeziehung der Wissenschaft angeregt (Stichwort „Massentierhaltung").
- Auf den enormen Verbrauch von Düngemittel, Bioziden und Wasser zur Bereitstellung von Futtermitteln soll hier ausdrücklich hingewiesen werden.

Ausweg: Weniger Konsum tierischer Lebensmittel

Vor dem Hintergrund dieser Informationen ist unbedingt eine Diskussion zu führen, wie der Trend zu immer stärker steigenden fleischbezogenen Ernährungsgewohnheiten in den Schwellenländern und der enorme Fleischkonsum in den Industrieländern vermindert bzw. umgekehrt werden kann. Gelingt dies,

- wird der Druck auf die Verfügbarkeit von pflanzlichen Nahrungsmittel nachlassen und die Versorgungssicherheit steigen und die Preise pflanzlicher Nahrungsmittel werden fallen und stabiler werden;
- werden eine mehr ökologisch orientierte Lebensmittelproduktion und eventuell die Erzeugung pflanzlicher Energieträger und Rohstoffe möglich sowie Flächen für eventuelle Wiederaufforstung oder dem Naturschutz frei werden (Treibhausgassenke);
- kann der Anbau der in der Kritik stehenden Monokultur Mais reduziert werden zugunsten vielfältiger Anbausysteme (Zwischenfrucht-, Mehrkulturnutzung, Rotation, schnellwachsende Hölzer oder Waldfeldbau etc.), welche zu einer Bereicherung der Landschaft führen und so die Wertschätzung für die Landwirtschaft erhöhen;
- werden weniger Treibhausgase und Ammoniak aus der Tierhaltung in die Atmosphäre und weniger Nitrat, Phosphat, Biozide und Tierarzneimittel in das Wasser gelangen;
- werden sich die ethisch unakzeptablen Tierhaltungsbedingungen verbessern;
- wird eine gesündere Ernährung in den fleischorientierten Ländern resultieren.

Unter-/Überernährung: Einerseits existieren auf dieser Welt vor allem in Süd- und Südostasien sowie in Subsahara-Afrika etwa 800 Mio. chronisch hungernde Menschen (das ist etwa jeder 9. Mensch) verursacht durch unzureichenden Zugang und keine kontinuierliche Verfügbarkeit mengenmäßig genügender und qualitativ ausgewogener Nahrung (FAO et al. 2015), was insbesondere durch Armut bedingt ist (Grethe et al. 2011). Auf der anderen Seite steht die starke Zunahme an Übergewicht bei Erwachsenen und Kindern, meist verursacht durch einen übermäßigen Genuss von Nahrungsmittel, aber auch durch unausgewogene Ernährung und Bewegungsmangel. Nach dem aktuellen „Global Nutrition Report" sind inzwischen in fast der Hälfte aller Länder weltweit genauso viele Menschen zu dick wie mangelernährt (International Food Policy Research Institute 2016). Betroffen sind insbesondere Kinder. Adipositas (Fettleibigkeit) ist verbunden mit stark erhöhten Risiken für Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs, Diabetis, Arthrose (Gelenkentzündung), and chronische Nierenerkrankung (Ng et al. 2014). Inzwischen leben auf der Welt mehr fettleibige als untergewichtige erwachsene Menschen (NCD Risk Factor Collaboration 2016): 2014 waren 266 Mio. Männer (10,8 % der Männer) und 375 Mio. Frauen (14,9%) auf der Welt adipös (fettleibig), das bedeuted jeder Siebte bis Achte der erwachsenen Weltbevölkerung. Wenn sich der Trend

nicht ändert, könnte der Anteil adipöser Männer bis zum Jahr 2025 auf 18 % ansteigen, bei Frauen auf über 21 %. Adipositas ist besonders ausgeprägt in den Industrieländern, inzwischen auch in stark steigendem Maße in Schwellen- und Entwicklungsländern. In Deutschland waren 2014 8,3 Mio. Männer und 8,5 Mio. Frauen fettleibig, 1975 waren es „nur" 2,0 Mio. Männer und 3,1 Mio. Frauen (NCD Risk Factor Collaboration 2016). An Übergewicht generell leiden bereits rund 60 % der 18- bis 79-jährigen Deutschen (Mensink et al. 2013).

Verluste bei der Nahrungsmittelproduktion und -verbrauch: Eine ebenfalls in den letzten Jahren immer wieder geführte Diskussion ist das Freiwerden zusätzlicher landwirtschaftlicher Flächen, wenn die Verluste bei der Nahrungsmittelproduktion bzw. durch das Wegwerfen von Nahrungsmittel deutlich reduziert werden könnte, Lebensmittel also massiv verloren gehen. Zusätzlicher Flächenverbrauch entsteht in den Entwicklungsländern insbesondere durch direkte Ernteverluste und das Fehlen verlustreduzierender Infrastrukturen (Mangel an Transportmöglichkeiten, unzureichende Kühlung und Konservierung verderblicher Lebensmittel etc.). In den entwickelten Ländern geht weniger Nahrung bei der Ernte und der Nacherntebehandlung und Lagerung verloren, dagegen aber erhebliche Mengen durch Wegwerfverluste in den Märkten und beim Verbraucher, bedingt durch Überschreitung von Mindest-Haltbarkeitsfristen bzw. durch das Entsorgen überschüssiger, nicht schmeckender oder verdorbener Nahrung (Kranert et al. 2012; Noleppa & Cartsburg 2015b). Bei Obst und Gemüse verhindert zusätzlich die Größenormierung vollständige Ernten und trägt damit zum Flächenverlust bei. Die Verlustanteile in der Kette Produktion-Handel-Verbraucher hängen sehr stark vom jeweiligen Nahrungsmittel ab.

Zwischen 30 bis 50 % der globalen Ernte erreichen entweder nicht die Verbraucher bzw. landen als Wegwerfverlust im Müll (West et al. 2014; Noleppa & Cartsburg 2015b; FAO 2015). Die Nahrungsmittelverluste betragen global etwa 30 % beim Getreide, 40-50 % bei Hackfrüchten, Früchten und Gemüse und 20 % bei Ölsamen und tierischen Produkten (FAO 2015). Als Menge sind dies weltweit etwa 1,3 Mrd. t, also ungefähr 180 kg pro Erdenbürger und Jahr. Die Kosten für globale Nahrungsmittelverluste belaufen sich auf 1 Billion US$ pro Jahr, die Treibhausgasemissionen durch diese Verluste auf 3,3 Gigatonnen CO_2-Äquivalente (FAO 2015). In Deutschland gehen jährlich im Durchschnitt etwa 18,4 Mio. t von 54,5 Mio. t verbrauchter Nahrungsmittel verloren, also etwa ein Drittel: Ernte: 1,0 Mio. t, Prozessverluste bei der Weiterverarbeitung: 4,2 Mio. t, Groß- und Einzelhandel: 2,6 Mio. t, Großverbraucher: 3,4 Mio. t, private Haushalte: 7,2 Mio t (Noleppa & Cartsburg 2015b). Dies entspricht etwa 230 kg pro Einwohner und Jahr. 9,9 Mio. t der 18.4 Mio. t Lebensmittelabfälle sind vermeidbar, insbesondere im Handel, bei den Großverbrauchern und in den Haushalten. Das entspricht rund 2,6 Mio. ha oder 15 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland. Ähnlich wie beim Konsum tierischer Lebensmittel können also durch Eindämmen dieser Verluste Landnutzungsänderungen vermieden werden (auch in Übersee),

Treibhausgas- und Ammoniakemissionen, Energie-, Düngemittel-, Biozid- und Wasserverbrauch sowie Wasserbelastung etc. verringert werden (Noleppa & Cartsburg 2015b; FAO 2015), die ökonomischen Verluste minimiert und die Nahrungsmittelversorgung gesichert werden.

In den Industrieländern besteht ein deutliches Informationsdefizit bezüglich der Lebensmittelverluste und hieraus resultierend ein unzureichendes Problembewusstsein. Eine zusätzliche Herausforderung hierbei ist die Überwindung von Gewohnheiten, die meist kulturell, im „Lifestyle" und Lebensstandard sowie in Konsumentenerwartungshaltungen verankert sind.

1.1.6 Vom Problem zur Chance!

Zusammengefasst verursachen die Nutzung pflanzlicher Biomasse für die tierische Produktion wie auch die hohen Verluste bei der Produktion sowie das Wegwerfen von Nahrungsmitteln einen extremen Verbrauch an Flächen und sind maßgeblich an der Freisetzung von Treibhausgasen, dem Einsatz von Pestiziden und der schnellen Verknappung der begrenzten Phosphatdünger, Verbrauch und Kontamination von Wasser beteiligt. West et al. (2014) brachten einen zusätzlichen Aspekt in die Diskussion: Wenn in bisher wenig ertragreichen landwirtschaftlichen Arealen der ärmeren Länder die Erträge auf Feldern auf mindestens 50 % der dort möglichen Erträge gesteigert würden, ständen Nahrungsmittel für weitere 850 Mio. Menschen zur Verfügung.

Es gibt also insgesamt gesehen die Potentiale, dass a) alle Menschen satt werden können und b) zusätzliche Flächen bereitgestellt werden könnten für den Anbau von Energiepflanzen oder Pflanzen für die stoffliche Nutzung. Es muss jedoch mehr Ausgewogenheit hergestellt werden, indem der Acker vermehrt zur direkten pflanzlichen Nahrungsmittelproduktion und erheblich weniger zur Futtermittelproduktion, die Weiden für die Erzeugung tierischer Produkte beitragen und die Bioenergie sowie pflanzliche Rohstoffe aus Abfallbiomassen vom Acker und aus Wäldern sowie aus Produkten der Kaskadennutzung erzeugt werden. Die Möglichkeiten der Kaskadennutzung, also die möglichst mehrstufige sequentielle Nutzung von biogenen Rohstoffen für stoffliche Anwendungen und dann am Ende des Produktlebenszyklus für die Energiegewinnung, müssen systematisch erkundet und ausgebaut werden (z.B. Keegan et al. 2013; Carus et al. 2014, 2015; Fehrenbach et al. 2017). Ein Beispiel hierfür ist die Holz-Kaskade Bauholz → Sperrholz → Pellets → Energie. Bei Bauholz und Sperrholz kann also eine Mehrfachnutzung stattfinden. Carus et al. (2014) weisen auf die wachsende Bedeutung der stofflichen Nutzung von Biomasse hin. Dies muss bei zukünftigen Prognosen in das Spannungsfeld Nahrungs-/Futtermittel – stoffliche Nutzung – energetische Nutzung einbezogen werden, welche alle um die begrenzten Flächen konkurrieren.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Schaffung von Arbeitsplätzen im Bereich der Bioenergie. Nach IRENA (2016) waren in Deutschland 2015 355.000 Jobs im Bereich der erneuerbaren Energien vorhanden, 42.000 davon auf dem Biogassek-

tor, 49.000 im Bereich feste Biomasse und 23.000 im Treibstoffsektor. Aufgrund der Umgestaltung des Erneuerbaren-Energien-Gesetz nahm die Beschäftigungszahl leider nicht zu, sondern im Vergleich zu 2014 um 4 % ab. Die Investitionen in Eneuerbare-Energien-Anlagen in Deutschland sind von 2010 (27,3 Mrd. €) bis 2015 auf fast die Hälfte (14,5 Mrd. €) gefallen (BMWI 2016). Die Abnahme wäre ohne eine Kompensation durch Exporte von Anlagen für erneuerbare Energien erheblich stärker ausgefallen. Exporte sichern etwa ein Viertel der Arbeitsplätze im erneubaren Energiebereich.

Global sind nach IRENA (2016) im Bereich der erneuerbaren Energien (ohne große Wasserkraftwerke) insgesamt 8.079.000 Menschen beschäftigt, davon 382.000 im Bereich Biogas, 822.000 bei der festen Biomasse und 1.678.000 bei Flüssigkraftstoffen. Die 41 Mio. global existierenden Arbeitsplätze in der traditionellen Brennholzbeschaffung aus Wäldern, Herstellung von Holzkohle etc. sind in den Zahlen nicht einbezogen. Diese heute häufig nicht nachhaltig erzeugten Brennstoffe versorgen 3 Milliarden Menschen mit Wärme und tragen zu 9 % des globalen Endernergieverbrauchs bei. Zahlreiche neue Jobs entstehen momentan beim Auf- und Ausbau einfacher Kleinbiogasanlagen für einen oder mehrere Haushalte in den ärmeren Ländern. Diese Anlagen verwerten pflanzliche und tierische Rest- und Abfallbiomassen als Inputstoffe, wodurch die Abholzung der Wälder (Klimaschutz) vermindert und eine saubere Verbrennung ohne Feinpartikelbelastung durch Rauch ermöglicht wird, was die Gesundheitsrisiken der Menschen (insbesondere Frauen und Kinder) in Häusern und Siedlungen erheblich vermindert. Biogas kann neben Kochen und Heizen auch für die Beleuchtung mit Gaslampen verwendet werden. Der Rückstand aus den Biogasanlagen ist ein wertvolles Düngemittel. Die Investitionskosten von wenigen 100 € in eine Kleinbiogasanlage für einen Haushalt amortisieren sich in wenigen Jahren, da das Inputmaterial i.d.R. kostenlos ist. Biogasanlagen in geeigneten armen Regionen dieser Erde schützen also Leben und das Klima und sparen Zeit und Geld (WHO 2016).

Abschließende Statements:

- Die Nahrungsmittelversorgung aus dem ländlichen Raum muss global wie auch in Deutschland Vorrang vor der Produktion von Bioenergie und biologischen Stoffen haben.
- Die Herstellung von Bioenergie sollte primär pflanzliche und tierische Rest- und Abfallbiomassen nutzen.
- Wir haben in Deutschland aber auch global erhebliche Potentiale für die Erzeugung von Bioenergie und für die stoffliche Nutzung von Biomasse, wenn folgendes erreicht wird:
  - Änderungen der Essgewohnheiten zugunsten mehr pflanzlicher Ernährung,
  - Minimierung der Anbau-, Nachernte-, Verarbeitungs- und Wegwerfverluste von Nahrungsmitteln,

- Steigerung der Produktivität von Feldern insbesondere in den Entwicklungsländern unter Beachtung von Nachhaltigkeitskriterien,
- Aufbau stofflicher Nutzungskaskaden mit dem Endprodukt Energie.

Literatur

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien 2015). *Metaanalyse Nutzungspfade der Bioenergie für die Energiewende.* Forschungsradar Energiewende. 18 S. Gesichtet am 21.4.2016: http://www.forschungsradar.de/fileadmin/user_upload/AEE_Metaanalyse_Bioenergie_Nutzungspfade_final_okt15.pdf

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien 2016a). *Metaanalyse Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr.* Forschungsradar Energiewende, 23 S. Gesichtet am 21.4.2016: http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_sektorkopplung_042016/AEE_Metaanalyse_Flexibilitaet_Sektorkopplung_apr16.pdf

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien 2016b). *Biokraftstoff als Baustein erneuerbarer Mobilität gezielt einsetzen.* 3.5.2016. Gesichtet am 22.12.2016: https://www.unendlich-viel-energie.de/presse/pressemitteilungen/biokraftstoff-als-baustein-erneuerbarer-mobilitaet-gezielt-einsetzen

Alexander, P., Brown, C., Arneth, A., Finnigan, J. & Rounsevell, M.D.A. (2016). Human appropriation of land for food: the Role of diet. *Global Environmental Change* 41, 88–98

Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., Olson, C., Sztein, A.E. & Sparks, D.L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science* 348 (6235); http://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1261071

Bauen, A., Berndes, G. Junginger, M., Londo, M. & Vuille, F. (2011). *Bioenergy - a sustainable and reliable energy source - A review of status and prospects*. Main Report, 108 S., IEA Bioenergy. Gesichtet am 27.11.2012: http://www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=6479

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016). *Erneuerbare Energien in Deutschland - Daten zur Entwicklung im Jahr 2015.* 18. S. Gesichtet am 4.5.2016: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Bringezu, S., Schütz, H., Schepelmann, P., Lange, U., von Geibler, J. Bienge, K., Kristof, K. Arnold, K., Merten, F., Ramesohl, S., Fischedick, M., Borelbach, P., Kabasci, S., Michels, C., Reinhardt, G. A., Gärtner, S., Rettenmaier, N. & Münch, J. (2009). *Nachhaltige Flächennutzung und nachwachsende Rohstoffe Optionen*

einer nachhaltigen Flächennutzung und Ressourcenschutzstrategien unter besonderer Berücksichtigung der nachhaltigen Versorgung mit nachwachsenden Rohstoffen. Umweltbundesamt 34/2009, 277 S., Dessau. Gesichtet am 4.12.2013. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3861.pdf

Carus, M., Raschka, A., Fehrenbach, H., Rettenmaier, N., Dammer, L., Köppen, S., Thöne, M., Dobroschke, S., Diekmann, L., Hermann, A., Hennenberg, K., Essel, R., Piotrowski, S., Detzel, A., Keller, H., Kauertz, B., Gärtner, S. & Reinhardt, J. (2014). Ökologische Innovationspolitik - Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. Langfassung, *Umweltbundesamt Texte* 01/2014, 227 S. Gesichtet am 12.7.2015: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_01_2014_druckfassung_uba_stofflich_abschlussbericht_lang_20_2_2014_2.pdf

Carus, M., Dammer, L. & Essel, R. (2015). *Quo vadis, cascading use of biomass?* 12 S. Gesichtet am 6.5.2015: http://bio-based.eu/?did=13120&vp_edd_act=show_download

Cassidy, E.S., West, P.C., Gerber, J.S. & Foley, J.A. (2013). Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. *Environmental Research Letters* 8(3), 034015, 9 S. + Supplement. doi:10.1088/1748-9326/8/3/034015

Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R. & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* 4, 287–291.

Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., Goss Eng, A., Lucht, W., Mapako, M., Masera Cerutti, O., McIntyre, T., Minowa, T., & Pingoud, K. (2011). Bioenergy. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, & C. von Stechow (Hrsg.), *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. S. 209–331. Cambridge/New York: Cambridge University Press. Gesichtet am 18. 10. 2012: http://srren.ipcc-wg3.de/report

Dawson, T.P., Perryman, A.H. & Osborne, T.M. (2016). Modelling impacts of climate change on global food security. *Climatic Change* 134, 429-440.

de Ridder, M., de Jong, S., Polchar, J. & Lingemann S. (2012). Risks and Opportunities in the Global Phosphate Rock Market. *The Hague Centre for Strategic Studies (HCSS) Rapport* N° 17|12 |12; 101 S. ISBN/EAN: 978-94-91040-69-6. Gesichtet am 12.8.2015 http://static.hcss.nl/files/uploads/2053.pdf

DGE (Deutsche Gesellschaft für Ernährung 2013). *Vollwertig essen und trinken nach den 10 Regeln der DGE*. Gesichtet am 4.4.2016: https://www.dge.de/fileadmin/public/doc/fm/10-Regeln-der-DGE.pdf

Erb, K.-H., Lauk, C., Kastner, T., Mayer, A., Theurl, M. C. & Haberl, H. (2016). Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nature Communications*, 9 S., 10.1038/10.1038/NCOMMS11382

EU (2013). *The impact of EU consumption on deforestation: Comprehensive analysis of the impact of EU consumption on deforestation.* Technical Report - 2013 - 063, 348 S. Gesichtet am 5.4.2016: www.ec.europa.eu/environment/forests/pdf/1.%20Report%20analysis%20of%20impact.pdf

FAO (2015). *Global initiative on food loss and waste reduction.* 8 S. Gesichtet am 8.4.2016: http://www.fao.org/3/a-i4068e.pdf

FAO, IFAD & WFP (2015). *The State of Food Insecurity in the World 2015* - Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. 62 S., FAO, ISBN 978-92-5-108785-5, Rome. Gesichtet am 28.11.2016: http://www.fao.org/docrep/018/i3434e/i3434e.pdf

Fehrenbach, H., Köppen, S., Kauertz, B., Detzel, A., Wellenreuther, F., Breitmayer, E., Essel, R., Carus, M., Bienge, K. & von Geibler, J. (2017). BIOMASSEKASKADEN Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. *Umweltbundesamt Texte* 53/2017, 134 S. Gesichtet am 19.6.2017: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-06-13_texte_53-2017_biokaskaden_kurzfassung.pdf

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016a). *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2016.* 52 S. Gesichtet am 31.11.2016: http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_20162.pdf

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016b). *Einheimische Bioenergie kann 2050 bis zu 26 Prozent unseres Primärenergiebedarfs decken.* Pressemitteilung. Gesichtet am 27.4.2016: http://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/?tx_ttnews[year]=2016&tx_ttnews[month]=04&tx_ttnews[day]=27&tx_ttnews[tt_news]=9023&cHash=70fe5aa557611bd88529423c9c255c2a

Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, Chr., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, Chr., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. & Zaks, D.P.M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337-342.

Fraunhofer IWES (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik 2015). Klimaschutzziele nur mit Wärme durch Strom aus erneuerbaren Energien erreichbar. Gesichtet am 31.3.2016: http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-

neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Presseinformationen/2015/PI_Strom_W%C3%A4rme_Interaktion_20150504.pdf

Grethe, H., Dembele, A. & Duman, N. (2011). *How to feed the world's growing billions: understanding FAO world food projections and their implications*. 64 S., Berlin, 2011, Heinrich Böll-Stiftung und WWF, Deutschland. Gesichtet am 14.4.2015: http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_BOELL_How_to_feed.pdf

Haberl, H., Körner, C., Lauk, C., Schmid-Staiger, U., Smetacek, V., Schulze, E.-D., Thauer, R. K., Weiland, P., & Wilson, K. (2013). Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit von pflanzlicher Biomasse als Energiequelle. In Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina - Nationale Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): *Stellungnahme Bioenergie - Möglichkeiten und Grenzen*, S. 10-50. Gesichtet 4.4.2016: http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2013_06_Stellungnahme_Bioenergie_DE.pdf

Hannappel, S., Groeneweg, J. & Zühlke, S. (2014). Antibiotika und Antiparasitika im Grundwasser unter Standorten mit hoher Viehbesatzdichte. *Umweltbundesamt Texte* 27/2014, 169 S. Gesichtet am 15.4.2016: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/texte_27_2014_antibiotika_und_antiparasitika_im_grundwasser_unter_standorten_mit_hoher_viehbesatzdichte_final.pdf

International Food Policy Research Institute (2016). *Global Nutrition Report 2016: From Promise to Impact: Ending Malnutrition by 2030*. XXI + 156 S. Washington, DC. Gesichtet am 16.6.2016: http://www.ifpri.org/cdmref/p15738coll2/id/130354/filename/130565.pdf

IRENA (International Renewable Energy Agency 2016). *Renewable Engery and Jobs - Annual Review 2016*. 21 S. Gesichtet am 30.5.2016: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Jobs_Annual_Review_2016.pdf

Jering, A., Klatt, A., Seven, J., Ehlers, K., Günther, J., Ostermeier, A. & Mönch, L. (2013). *Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und resssourcenschonend nutzen*. Umweltbundesamt, Dessau, 106 S. Gesichtet am 13.8.2015: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale_landflaechen_biomasse_bf_klein.pdf

Keegan, D., Kretschmer, B., Elbersen, B. & Panoutsou, C. (2013). Cascading use: a systematic approach to biomass beyond the energy sector. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 7:193–206.

Kranert, M., Hafner, G., Barabosz, J., Schuller, H., Leverenz, D., Kölbig, A., Schneider, F., Lebersorger, S. & Scherhaufer, S. (2012). *Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland.* 453 S. Gesichtet 1.8.2014:

http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ernaehrung/WvL/Studie_Lebensmittelabfaelle_Langfassung.pdf;jsessionid=F4DC198695907E99D2D29D6D8B0C692D.2_cid367?__blob=publicationFile

LMC-International (2009). *Evaluation of measures applied under common agricultural policy to the protein crop sector*. Gesichtet am 29.8.2017: https://ec.europa.eu/agriculture/evaluation/market-and-income-reports/2009-protein-crops_en

LWK Niedersachsen (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2016). *Nährstoffbericht in Bezug auf Wirtschaftsdünger für Niedersachsen 2014/2015*. Oldenburg. 208 S. Gesichtet am 4.4.2016: https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/1787,363a649c-bc12-6175-41ed2e3a21632674~pdf.html

McMichael, A. J, Powles, J. W., Butler, C. D. & Uauy, R. (2007). Food, livestock production, energy, climate change, and health. *The Lancet* 370, 1253–1263.

Meier, T., Christen, O., Semler, E., Jahreis, G., Voget-Kleschin, L., Schrode, A. & Artmann, M. (2014). Balancing virtual land imports by a shift in the diet: Using a land balance approach to assess the sustainability of food consumption. *Appetite* 74, 20-34

Mensink , G.B.M, Schienkiewitz, A., Haftenberger, M., Lampert, T., Ziese, T. & Scheidt-Nave, C. (2013). Übergewicht und Adipositas in Deutschland. Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsblatt* 56, 786–794.

meó Carbon Solutions (2014). Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR, Hrsg.): *Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe* 34, 1116 S. Gesichtet am 7.3.2016: http://fnr.de/marktanalyse/marktanalyse.pdf

Nachtergaele, F.O., Petri, M. & Biancalani, R. (2011). Land Degradation. In: Lal, R. & Stewart, B.A. (Hrsg.). World Soil Resources and Food Security. *Advances in Soil Sciences* 14, 471-497; Taylor and Francis, CRC Press. Alternative Quelle gesichtet am 12.8.2015: http://www.fao.org/fileadmin/templates/solaw/files/thematic_reports/SOLAW_thematic_report_3_land_degradation.pdf

NCD Risk Factor Collaboration (2016). Trends in adult body-mass index in 200 countries from 1975 to 2014: a pooled analysis of 1698 population-based measurement studies with 19.2 million participants. *The Lancet* 387, 1377-1396

Ng, M., Fleming, T., Robinson, M., Thomson, B., Graetz, N., Margono, C., Mullany, E.C., Biryukov, S. et al. (2014). Global, regional, and national prevalence of overweight and obesity in children and adults during 1980–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet* 2014 (May 29). http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60460-8

Noleppa, S. (2012). *Klimawandel auf dem Teller*. WWF-Studie, 86 S. Gesichtet am 21.4.2016: http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klimawandel_auf_dem_Teller.pdf

Noleppa, S. & Cartsburg, M. (2015a). *Nahrungsmittelverbrauch und Fußabdrücke des Konsums in Deutschland - Eine Neubewertung unserer Ressourcennutzung.* 63 S. Gesichtet am 11.3.2016: http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Studie_Nahrungsmittelverbrauch_und_Fussabduecke_des_Konsums_in_Deutschland.pdf

Noleppa, S. & Cartsburg, M. (2015b). *Das Große Wegschmeissen - Vom Acker bis zum Verbraucher: Ausmaß und Umwelteffekte der Lebensmittelverschwendung in Deutschland.* WWF Deutschland (Hrsg.). 68 S. Gesichtet am 8.4.2016: http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Studie_Das_grosse_Wegschmeissen.pdf

OECD-FAO (2015). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2015-2024*. Gesichtet am 2.4.2015: http://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2015_agr_outlook-2015-en

OVID (Verband der ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland; 2016). *Daten & Grafiken.* Gesichtet am 16.1.2017: http://www.ovid-verband.de/unsere-branche/daten-und-grafiken/

Pimentel, D. & Burgess, M. (2013). Soil erosion threatens food production. *Agriculture* 3, 443–463.

Piotrowski, S., Carus, M. & Essel, R. (2015). Globale Bioökonomie im Spannungsfeld von Biomasseangebot und -nachfrage. *nova-Paper #7 zu biobasierter Ökonomie* 2015-09, 14 S. Gesichtet am 31.3.2016: http://bio-based.eu/?did=28167&vp_edd_act=show_download

Raschka, A., Carus, M., Dammer, L. & Piotrowski, S. (2014). Erfassung der Biomasseströme für Deutschland, Europa und die Welt. In Carus, M. et al.: Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. *Umweltbundesamt Texte* 01/2014, S. 20-50. Gesichtet am 31.3.2016: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_01_2014_druckfassung_uba_stofflich_abschlussbericht_lang_20_2_2014_2.pdf

REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century 2016). *Renewables 2016 - Global Status Report.* 271 S. Gesichtet am 6.6.2016: http://www.ren21.net/GSR-2016-Report-Full-report-EN

REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century 2017). *Renewables 2017 - Global Status Report.* 302 S. Gesichtet am 6.7.2017: http://www.ren21.net/gsr_2017_full_report_en

Rickson, R.J., Deeks, L.K., Graves, A., Harris, J.A.H., Kibblewhite, M.G. & Sakrabani, R. (2015). Input constraints to food production: the impact of soil degradation. *Food Security* 7, 351–64.

Rosemarin, A. & Ekane, N. (2016). The governance gap surrounding phosphorus. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 104, 265–279.

Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J. (2013). Sustainable Bioenergy Production. An Integrated Perspective. In Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J. (Hrsg.). *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach*. S. 3-35. Berlin: Springer.

Seto, K.C., Fragkias, M., Güneralp, B. & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS ONE* 6(8), e23777. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0023777

Statistisches Bundesamt (2015a). *Flächenbelegung von Erzeugnissen tierischen Ursprungs 2013*. 11. S. Gesichtet am 4.4.2015: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/LandwirtschaftundUmwelt/Flaechenbelegung_5851309139004.pdf?__blob=publicationFile

Statistisches Bundesamt (2015b). *Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach ausgewählten Hauptnutzungsarten.* Gesichtet am 8.5.2015: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/LandwirtschaftlicheBetriebe/Tabellen/LandwirtschaftlicheBetriebeFlaechenHauptnutzungsarten.html

Ulrich, A.E. (2013). *Peak phosphorus: opportunity in the making - Exploring global phosphorus management and stewardship for a sustainable future.* Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 21599. 205 S. Gesichtet am 12.8.2015: http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:8669/eth-8669-02.pdf

UNEP (2014). *Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel.* Authors: Bringezu, S., Schütz, H., Pengue, W., O´Brien, M., Garcia, F., Sims, R., Howarth, R., Kauppi, L., Swilling, M.,& Herrick, J.; 132 S.. Gesichtet am 7.5.2015: http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs//Full_Report-Assessing_Global_Land_UseEnglish_(PDF).pdf

Vaccari, D.A., Mew, M., Scholz, R.W., & Wellmer, F.-W. (2014). Exploration: What Reserves and Resources? In Scholz, R.W., Roy, A.H., Brand, F.S., Hellums, D. & Ulrich, A.E. (Hrsg.): *Sustainable Phosphorus Management - A Global Transdisciplinary Roadmap*. S. 129-151; Springer Netherland. ISBN 978-94-007-7249-6

Vermeulen, S.J., Campbell, B. M. & Ingram, J. S. I. (2012). Climate Change and Food Systems. *Annual Review of Environment and Resources* 37, 195-222.

von Dornburg, V., Faaij, A., Langeveld, H., van de Ven, G., Wester, F., van Keulen, H., van Diepen, K., Ros, J., van Vuuren, D., van den Born, G.J., van Oorschot, M., Smout, F., Aiking, H., Londo, M., Mozaffarian, H., Smekens, K., Meeusen, M., Banse, M., Lysen E., & van Egmond (2008). *Biomass Assessment: Assessment of global biomass potentials and their links to food, water, biodiversity, energy demand and economy.* Report 500102 012, 107 S. Gesichtet am 25.11.2012: http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/500102012.pdf

von Witzke, H., Noleppa, S. & Zhirkova, I. (2011). *Fleisch frisst Land.* WWF-Studie. 73 S. Gesichtet am 5.4.2016: http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Fleischkonsum_web.pdf

WBA (Wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2015). *Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung.* Gutachten, 425 S. Gesichtet am 4.4.2016: http://www.etracker.com/lnkcnt.php?et=dQsrB9&url=http%3A%2F%2Fwww.bmel.de%2FSharedDocs%2FDownloads%2FMinisterium%2FBeiraete%2FAgrarpolitik%2FGutachtenNutztierhaltung.pdf%3F__blob%3DpublicationFile&lnkname=GutachtenWBANutztierhaltung

West, P.C., Gerber, J.S., Engstrom, P.M., Mueller, N.D., Brauman, K.A., Carlson, K.M., Cassidy, E.S., Johnston, M., MacDonald, G.K., Ray, D.K. & Siebert, S. (2014). Leverage points for improving global food security and the environment. *Science* 345, 325-328.

Wheeler, T., & von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science* 341, 508-513.

WHO (World Health Organization 2016). *Burning Opportunity: Clean Household Energy for Health, Sustainable Development, and Wellbeing of Women and Children.* 113 S., ISBN: 9789241565233. Gesichtet am 29.5.2016: http://www.who.int/iris/bitstream/10665/204717/1/9789241565233_eng.pdf?ua=1

Zeddies, J., Bahrs, E., Schönleber, N. & Gamer, W. (2012). *Globale Analyse und Abschätzung des Biomasse-Flächennutzungspotentials.* Gesichtet am 7.5.2015: https://www.uni-hohenheim.de/i410b/download/publikationen/Globale%20Biomassepotenziale%20_%20FNR%2022003911%20Zwischenbericht%202012.pdf

Zeddies, J., Bahrs, E., Schönleber, N., Gamer, W. & Empl, J.-B. (2014). *Optimierung der Biomassenutzung nach Effizienz in Bereitstellung und Verwendung unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielen und Welternährungssicherung.* Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FKZ 22003911/11NR039; 231 S., Gesichtet am 11.7.2017: https://doi.org/10.2314/GBV:841210497

1.2 Energetische Nutzung von Biomasse in Niedersachsen und Deutschland

Hans Ruppert

1.2.1 Fakten zum Vergleich Niedersachsen - Deutschland

Die Problematik für eine Abschätzung der Bioenergiepotenziale für Deutschland und für die Welt ist in Kap. 1.1 ausführlich beschrieben. Hier wird eine Übersicht zum Status der Bioenergie in Niedersachsen und ein Vergleich mit Deutschland vorgestellt. Basis ist der bereits für das Jahr 2011 erschienene „Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern" der Agentur für Erneuerbare Energien (AEE 2013) mit vielen Aktualisierungen, die im Internet auf der Webseite Föderal-Erneuerbar zugänglich sind (AEE 2017; Stand April 2017), teilweise auch im Report „Bundesländer mit neuer Energie – Statusreport Föderal Erneuerbar 2016/17" (AEE 2016). Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 1-2 zusammengeführt, teilweise ergänzt bzw. aktualisiert durch weitere Quellen.

Die Bioenergie in Form von Strom, Wärme und Kraftstoffen befriedigte 2011 etwa 7 % des Endenergieverbrauchs in Niedersachsen, in Deutschland 8,4 %. Biomasse lieferte 2015 in Niedersachsen 11,5 % der Bruttostromerzeugung, in Deutschland 7,8 %, was gut einem Viertel der Stromerzeugung durch alle erneuerbare Energieträger entspricht. 2011 stellte die Bioenergie 8 % des Wärmeverbrauchs in Niedersachsen, in Deutschland 10,1 % (2016: 11,8 %) bereit, wobei die Bioenergie 2016 in Deutschland 88,1 % der Wärme aus erneuerbaren Energieträgern lieferte, 75,1 % alleine aus Festbrennstoffen. Die Produktion von Biokraftstoffen machte 2011 in Niedersachsen 3 % des Kraftstoffverbrauchs aus, in Deutschland 5,5 % mit abnehmender Tendenz (2016: 4,6 %).

Die Summe der Bioenergiepotentiale in Niedersachsen wird auf 179.000 TJ (Tera-Joule) geschätzt (AEE 2013). Davon entfallen 78 700 TJ auf Energiepflanzen (einschließlich Grünland) und 43.000 TJ auf forstwirtschaftliche Biomasse. Vom Waldholz werden bereits 16.600 TJ energetisch genutzt. Waldrestholz könnte zusätzlich 11.600 TJ beisteuern und ungenutzter Holzzuwachs noch 14.800 TJ. Altholz könnte 14.500 TJ und Industrierestholz 3100 TJ liefern sowie Strohrückstände 15.000 TJ, tierische Exkremente 21.500 TJ, Bio- und Grünabfall 2900 TJ beitragen. Die resultierenden GWh/Jahr für Niedersachsen und Deutschland sind in Tabelle 1-2 aufgelistet.

Auf Basis der Ausschöpfung dieser Potentiale wird für 2020 in Niedersachsen der Anteil der Bioenergie am Endenergieverbrauch mit 7 - 17 % (15 %) angegeben, für Deutschland mit 6 - 15 % (AEE 2017). Die maximalen Anteile der Bioenergie am Endenergieverbrauch wurden für vier Szenarien berechnet (AEE 2013, 2017),

wobei die Berechnungsgrundlagen im Sinne der Ausführungen in Kap. 1.1 insbesondere in Bezug auf Nutzungskonkurrenzenzu zu hinterfragen sind:

1. nur Strom aus Biomasse (ohne Wärme und Biokraftstoff)
2. nur Wärme aus Biomasse (ohne Strom und Biokraftstoff)
3. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) (ohne Biokraftstoff)
4. Biokraftstoffe mit nicht für Biokraftstoffproduktion nutzbaren KWK-Potenzialen, die zur Strom- und Wärmeproduktion verwendet werden.

Im Szenario 1 (nur Strom aus Biomasse) könnte die Bioenergie 2020 maximal 32 % des niedersächsischen bzw. 31 % des deutschen Nettostromverbrauchs bereitstellen. In Bezug auf den Endenergieverbrauch ist das aber nur ein Anteil von 7 % in Niedersachsen bzw. 6 % in Deutschland. Im Szenario 2 (nur Wärme aus Biomasse) könnten etwa 17 bzw. 15 % des Endenergieverbrauchs befriedigt werden, in Szenario 3 (KWK mit Biomasse) entsprechend 15 bzw. 14 % und in Szenario 4 (nur Biokraftstoffe) 14 bzw. 13 % des Endenergieverbrauchs. In Szenario 4 (Biokraftstoffe mit Verwendung der Restprodukte für Strom und Wärme durch KWK) könnten 2020 maximal 27 % des niedersächsischen Kraftstoffverbrauchs, 11 % des Nettostromverbrauchs und 10 % des Wärmeverbrauchs abgedeckt werden (AEE 2013).

In Niedersachsen spielt im Vergleich zu Deutschland die Bioenergie aus der Landwirtschaft eine deutlich stärkere Rolle als das Energieholz, da die Waldfläche in Niedersachsen nur 22,1 % der Landesfläche beträgt (Deutschland 30,6 %), Ackerland dagegen 39,6 % (Deutschland 33,2 %) und die gesamte landwirtschaftliche Fläche ohne Betriebsflächen 55,1 % (Deutschland 46,8 %). Der Energiepflanzenflächenanteil an der Landwirtschaftsfläche ist in Niedersachsen mit 13,0 % ähnlich groß wie in Deutschland (13,2 %). Allerdings werden in Niedersachsen 82,1 % der Energiepflanzenflächen für die Biogasproduktion benutzt (Deutschland nur 54,7 %), für Biodiesel dagegen nur 13,2 % (Deutschland 35,3 %) und für Bioethanol nur 4,4 % (Deutschland 9,5 %). Entsprechend ist die installierte elektrische Leistung für Biogas pro km^2 landwirtschaftlicher Fläche in Niedersachsen mit 34 kW/km^2 deutlich höher als in Deutschland (21 kW/km^2) bei gleichzeitig höherer mittlerer elektrischer Leistung einer Biogasanlage in Niedersachsen (565 kW) gegenüber Deutschland (450 kW). 2014 betrug das genutzte Biomassepotential für die Stromerzeugung am technischen Gesamtpotential in Niedersachsen 54 %, in Deutschland 43 %, ist also ausbaufähig.

Die 2014 in Niedersachsen vorhandenen 1566 vorwiegend landwirtschaftlichen Biogasanlagen hatten eine installierte elektrische Leistung von 1289 $MW_{el.}$. 2015 lieferten die Biogasanlagen 9,4 % der niedersächsischen Bruttostromproduktion bzw. 23,4 % des Stromes aus erneuerbaren Energiequellen. Die 2015 in Deutschland vorhandenen 7703 (2016: 8075) Biogasanlagen hatten eine Leistung von 3464 MW und erzeugten 4,8 % des Bruttostroms bzw. 16,7 % des erneuerbaren Stromes. Aufgrund der mit dem EEG (2014) weitgehend eingestellten Förde-

rung von neuen Nawaro-betriebenen Biogasanlagen stieg die Zahl der Biogasanlagen in den letzten Jahren nur minimal.

Im massebezogenen Durchschnitt aller Biogasanlagen in Deutschland machten 2014 nachwachsende Rohstoffe 48 % des Substratinputs in die Biogasanlagen aus, Gülle und Mist 44 %, Reststoffe und Abfälle 8 % (FNR 2016). Es ist allerdings zu bedenken, dass 1 t Gülle nur etwa 10-15 % der Energie enthält, die in der gleichen Masse an Energiepflanzen enthalten ist (Bezug auf feuchten Zustand). Die im Jahr 2013 in Niedersachsen in die Biogasanlagen eingebrachten Gärsubstrate waren nach 3N (2014a): a) Energiepflanzen und pflanzliche Nebenprodukte mit 13,2 Mio. t (82 % der elektrischen Leistung), b) Reststoffe (Gülle, Festmist, Gärreste) mit 7,4 Mio. t (11 % der elektrischen Leistung) und c) Bioabfälle (Fette, Flotate und organische Abfälle) mit 1,6 Mio. t (7 % der elektrischen Leistung). In Niedersachsen lagen Ende 2013 40 % der Biogasanlagen in sogenannten „Veredlungs"-Regionen, 24 % in Milchvieh-/Grünlandgebieten und 36 % in ackerbaulich dominierten Gebieten (3N 2014a). Die „Veredlungs"-Regionen, also Bereiche mit intensiver Tierhaltung und hohem Gülleanfall, liegen im westlichen Niedersachsen mit Schwerpunkten in den Gebieten Emsland, Cloppenburg, Diepholz und Rotenburg-Bremervörde (3N 2014a). In Milchvieh- bzw. Grünlandregionen mit Milchvieh werden die Biogasanlagen vorwiegend mit Gülle, Grünlandaufwüchsen und Futterresten beschickt, in Ackerbauregionen vorwiegend mit Energiepflanzen. Häufig sind die Biogasanlagen unmittelbar oder über längere Biogasleitungen mit Blockheizkraftwerken (BHKW) verbunden, wo aus dem Biogas gleichzeitig Strom und Wärme erzeugt werden. Ende 2013 waren in Niedersachsen 430 Satelliten-BHKWs aktiv, die mit Hilfe von Nahwärmenetzen vielfach Wohngebiete, Betriebe, Gärtnereien, kommunale Einrichtungen etc. mit Wärme versorgen (Rottmann-Meyer et al. 2014).

Bedeutsam für die Ackerflächennutzungskonkurrenz sind die in den Biogasanlagen eingesetzten NAWAROs: In Deutschland gelangten 2014 folgende Masseanteile in die Anlagen: 73 % Maissilage, 12 % Grassilage, 7 % Getreide-Ganzpflanzensilage, jeweils 2 % Getreidekorn, Zuckerrüben und Zwischenfrüchte sowie 1 % Landschaftspflegematerial und 1 % Sonstiges (FNR 2016). In Niedersachsen wurden 2014 die Biogasanlagen mit 84,7 % Maissilage und 5,5 % Grassilage gefüttert (errechnet nach Schünemann-Plag 2016). Ab dem EEG (2014) wurde der Maisinput in die Biogasanlagen auf höchstens 60 % begrenzt, um der „Vermaisung der Landschaft" entgegenzuwirken. 2013 betrug der Maisflächenanteil für Biogasanlagen an der landwirtschaftlich genutzen Fläche in Niedersachsen 8,4 %, in Deutschland 5,3 %. Der Anteil der Energiemaisfläche an der Gesamtmaisfläche in Niedersachsen und Deutschland war 37 %. Die Kritik der Vermaisung wird interessanterweise meist angewandt auf Energiemais selten aber auf den Maisanbau für die tierische Ernährung trotz dessen Flächendominanz.

In Niedersachsen standen 2014 24 Holzheizkraftwerke (ohne Holzgas) mit einer elektrischen Leistung von 161 $MW_{el.}$ zur Verfügung, in Deutschland 395 mit 1491 $MW_{el.}$. Diese Kraftwerke dienen gleichzeitig als zusätzliche Wärmequelle.

Tabelle 1-2: Zahlen zur Bioenergie in Niedersachsen und in Deutschland auf Basis der Zusammenstellung von AEE (2013, 2015, April 2017), wenn nicht anders vermerkt

Parameter	Einheit	Niedersachsen	Deutschland
Flächen			
Gesamte Bodenfläche 2014 (Statistisches Bundesamt 2015)	km^2	47 615	357 376
Waldfläche 2014 (Statistisches Bundesamt 2015)	km^2	10 507	109 306
Landwirtschaftlich genutzte Flächen ohne Betriebsflächen 2014 (Statistisches Bundesamt 2015)	km^2	26 259	167 248
Fläche Ackerland 2014 (Statistisches Bundesamt 2015)	km^2	18 855	118 692
Energiepflanzenfläche Niedersachsen (NS) 2013 (3N 2014a) bzw. Deutschland (D) 2015 (FNR 2016)	km^2	3410	22 035
Energiepflanzenfläche für Biogasanlagen 2013 (NS) (3N 2014a) und 2015 (D) (FNR 2016)	km^2	2800	13 930
Maisfläche für Biogasanlagen in Niedersachsen 2013 (3N 2014a) und Deutschland 2015 (FNR 2016)	km^2	2200	8940
Grünlandfläche für Biogasanlagen 2013 (3N 2014a)	km^2	200	?
Anteil der Waldfläche an der Gesamtfläche 2014	%	22,1	30,6
Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen (ohne Betriebsflächen) an Gesamtfläche 2014	%	55,1	46,8
Anteil Ackerland an der Bodenfläche 2014	%	39,6	33,2
Anteil der Energiepflanzenfläche an der Bodenfläche 2013 (NS) bzw. 2015 (D)	%	7,2	6,2
Anteil der Energiepflanzenfläche an der landwirtschaftlich genutzten Fläche 2013 (NS) bzw. 2015 (D)	%	13,0	13,2
Anteil der Maisfläche für Biogasanlagen an den landwirtschaftlich genutzten Flächen 2013 (NS) bzw. 2015 (D)	%	8,4	5,3
Anteil des Energiemaisfläche an der Gesamtmaisfläche 2013 (NS) bzw. 2015 (D) (Zusammenstellung verschiedener Quellen)	%	37	37
Anteil Biogas an der Energiepflanzenfläche 2013 (3N 2014a)	%	82,1	54,7
Anteil Biodiesel an der Energiepflanzenfläche 2013 (3N 2014a)	%	13,2	35,3
Anteil Bioethanol an der Energiepflanzenfläche 2013 (3N 2014a)	%	4,4	9,5
Strom aus Biomasse			
Bruttostromverbrauch gesamt 2014 (D: 2016: 594 700 GWh/Jahr; BMWi 2017)	GWh/Jahr	57 380	591 200
Bruttostromerzeugung gesamt 2015	GWh/Jahr	78 862	646 500
Stromerzeugung aus Biomasse 2015 (alle biologische Substrate)(2016 in D: 51 600 GWh/Jahr, BMWi 2017)	GWh/Jahr	9107	50 321
Stromerzeugung aus Biogas 2015 ohne Abfälle (2016 in D: 32 370 GWh/Jahr, BMWi 2017)	GWh/Jahr	7400	31280
Technisches Biogaspotential	GWh/Jahr	13 719	72 233
Genutztes Biogaspotenzial als Anteil am technischen Gesamtpotential bei der Stromerzeugung 2014	%	53,9	43,3
Installierte elektr. Leistung Biomasse (ohne Abfall) 2014 (2016 in D: 7112 MW(el.); BMWi 2017)	MW(el.)	1289	6969
Installierte Leistung (elektr.) Biogas 2014 (AEE 2016; Prognose 2015 für D: 4166 MW(el.), Fachverband Biogas 2016)	MW(el.)	885	3464
Installierte Leistung (elektr.) Biogas pro 1000 Einwohner 2014	kW(el.)/1000 Einw.	113	43
Installierte Leistung (elektr.) Biogas pro km² Landwirtschaftsfläche 2014	$kW(el.)/km^2$	34	21
Anzahl von Biogasanlagen 2014 (Prognose für D 2016 nach Fachverband Biogas 2016: 9009 Anlagen; nach FNR 2016: 8075 Anlagen)	n	1566	7703
Biogasanlagen pro 1000 km² Landwirtschaftsfläche 2014	$n/1000km^2$	60	46
Durchschnittliche Leistung Biogasanlagen 2014	kW	565	450
Durchschnittliche Jahresvolllaststunden Biomassekraftwerke (ohne biogenen Teil des Abfalls) 2014	h/Jahr	6818	6224
Anzahl Biomethanaufbereitungsanlagen 2014 (2015 für D: 186; BDWE 2016)	n	33	179
Installierte Leistung Holz(heiz)kraftwerke 2014 ohne Holzgas (Scheftelowitz et al. 2015)	MW(el.)	161	1491
Anzahl Holz(heiz)kraftwerke 2014 ohne Holzgas	n	24	395
Anzahl Biomasseanlagen für Stromerzeugung 2014 (BDEW 2016)	n	2719	13 782
Anteil der Biomassestromerzeugung an der Bruttostromerzeugung 2015	%	11,5	7,8
Anteil der Biomassestromerzeugung an der EE-Stromerzeugung 2015	%	28,8	26,9
Anteil Biogasstromerzeugung an der Bruttostromerzeugung 2015	%	9,4	4,8
Anteil von Biogas an der EE-Stromerzeugung 2015	%	23,4	16,7

Tabelle 1-2 (Fortsetzung)

Parameter	Einheit	Niedersachsen	Deutschland
Wärme aus Biomasse			
Wärmeproduktion aus Biomasse inkl. Abfall 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	148 053
Anteil der Bioenergie am gesamten Wärmeverbrauch 2011, geschätzt (2016 in D: 11,8 %; BMWi 2017)	%	8	10,1
Anteil der Bioenergie am Wärmeverbrauch aus erneuerbaren Energien 2016 (BMWi 2017)	%	?	88,1
Anteil biogener Festbrennstoffe am Wärmeverbrauch aus erneuerbaren Energien 2016 (BMWi 2017)	%	?	75,1
Wärmeverbrauch biogene Festbrennstoffe (inkl. Klärschlamm und Abfall) 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	126 320
Wärmeverbrauch biogene Festbrennstoffe in Haushalten 2015 (NS für Anlagen < 1MW: 3N 2016; D: BMWi 2017; 2016 in D: 67 986 GWh/Jahr)	GWh/Jahr	5486	61 900
Wärmeverbrauch biogene Festbrennstoffe in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	15 161
Wärmeverbrauch biogene Festbrennstoffe + Klärschlamm in Industrie 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	25 108
Wärmeverbrauch biogene Festbrennstoffe + Klärschlamm in Heizwerken und Heizkraftwerken (NS für 2012,3N 2016; D für 2016, BMWi 2017)	GWh/Jahr	2221	6233
Wärmebereitstellung Pelletheizungen 2015 (Deutsches Pelletinstitut 2017 für D 2015: 7450 GWh/Jahr, Prognose 2017: 8865 GWh/Jahr)	GWh/Jahr	360	5910
Wärmebereitstellung Scheitholzöfen und -kamine 2011 (AEE 2014)	GWh/Jahr	?	57 200
Wärmeverbrauch Biogas (inkl. Klär- und Deponiegas) 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	19 649
Wärmeverbrauch biogene flüssige Brennstoffe 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	2084
Leistung der Pelletheizungen 2015	MW	271	4457
Anzahl Holzpelletheizungen 2015 <1 MW (NS: 3N 2016; D: Deutsches Pelletinstitut 2017, Prognose 2017: 454 900)	n	19 055	390 500
Anzahl Holzhackschnitzelfeuerungen < 1 MW (3N 2016)	n	4053	-
Anzahl Scheitholzöfen und -kamine 2015 (NS für Anlagen < 1 MW: 3N 2016)	n	1 033 131	~15 000 000
Biokraftstoffe, Verkehr			
Endeenergieverbrauch Verkehr Biokraftstoffe inkl. Biomethan ohne Strom 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	29 892
Endenergieverbrauch von Biodiesel im Sektor Verkehr 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	20 832
Endenergieverbrauch von Pflanzenöl im Sektor Verkehr 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	42
Endenergieverbrauch von Bioethanol im Sektor Verkehr 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	8648
Endenergieverbrauch von Biomethan im Sektor Verkehr 2016 (BMWi 2017)	GWh/Jahr	?	370
Absatz der Biokraftstoffe (Summe) 2016 (BMWi 2017)	Tonnen/Jahr	?	3 201 000
Anteil Biokraftstoffe am Kraftstoffverbrauch 2011 (2016: 4,6 % in D; BMWi 2017)	%	3	5,5
Bioethanol-Tankstellen 2016	n	66	252
Biogas-Tankstellen (100% Biogas) 2014	n	21	182

Tabelle 1-2 (Fortsetzung)

Parameter	Einheit	Niedersachsen	Deutschland
Bioenergie-Potentiale (alle Werte aus Terajoulewerten in GWh/Jahr umgerechnet)			
Summe Bioenergiepotentiale	GWh/Jahr	49 611	398 950
Bioenergie-Potenzial Energiepflanzen (einschl. Grünlandflächen)	GWh/Jahr	21 849	150 513
Bioenergie-Potenzial Forstwirtschaftliche Biomasse (Summe)	GWh/Jahr	11 937	142 066
Energie des bereits energetisch genutzten Waldholzes	GWh/Jahr	4599	68 234
Bioenergie-Potenzial ungenutztes Waldrestholz	GWh/Jahr	3214	45 747
Bioenergie-Potenzial ungenutzter Holzzuwachs	GWh/Jahr	4123	28 086
Bioenergie-Potenzial ungenutztes Altholz	GWh/Jahr	4030	30 998
Bioenergie-Potenzial ungenutztes Industrierestholz	GWh/Jahr	857	16 111
Bioenergie-Potenzial Stroh	GWh/Jahr	4154	28 645
Bioenergie-Potenzial Tierische Exkremente	GWh/Jahr	5979	24 362
Bioenergie-Potenzial Bio- und Grünabfall	GWh/Jahr	804	6256
Abschätzungen der Entwicklung verschiedener Bioenergieszenarien bis 2020			
Anteil der Bioenergie am Endenergieverbrauch 2011 (geschätzt)	%	7	8,4
Maximaler Anteil der Bioenergie am Endenergieverbrauch 2020 - Szenario Nur Strom aus Biomasse	%	7	6
Maximaler Anteil der Bioenergie am Endenergieverbrauch 2020 - Szenario Nur Wärme aus Biomasse	%	17	15
Maximaler Anteil der Bioenergie am Endenergieverbrauch 2020 - Szenario KWK mit Biomasse	%	15	14
Maximaler Anteil der Bioenergie am Endenergieverbrauch 2020 - Szenario für Biokraftstoffe	%	14	13
Maximaler Anteil der Bioenergie am Nettostromverbrauch 2020 - Szenario Nur Strom aus Biomasse	%	32	31
Maximaler Anteil der Bioenergie am Wärmeverbrauch 2020 - Szenario Nur Wärme aus Biomasse (AEE 2013)	%	31	31
Maximaler Anteil der Bioenergie am Nettostromverbrauch 2020 - Szenario KWK mit Biomasse (kein Kraftstoff)(AEE 2013)	%	24	22
Maximaler Anteil der Bioenergie am Wärmeverbrauch 2020 - Szenario KWK mit Biomasse (kein Kraftstoff)(AEE 2013)	%	17	18
Maximaler Anteil der Bioenergie am Kraftstoffverbrauch 2020 - nutzbare Anteile für Kraftstoffe im Szenario Biokraftstoffe (AEE 2013)	%	27	?
Maximaler Anteil der Bioenergie am Nettostromverbrauch 2020 im Szenario Biokraftstoffe mit Nutzung der Restbiomasse für Strom und Wärme (KWK)	%	11	?
Maximaler Anteil der Bioenergie am Wärmeverbrauch 2020 im Szenario Biokraftstoffe mit Nutzung der Restbiomasse für Strom und Wärme (KWK)	%	10	?
Sonstige Zahlen			
Anteil des Maisinputs am gesamten Energiepflanzeninput in Biogasanlagen 2014 (NS: Schünemann-Plag 2016; D: FNR 2016)	%	84,7	73,0
Anteil des Grasinputs am gesamten Energiepflanzeninput in Biogasanlagen (FNR 2016)	%	5,5	12,0
Bioenergiedörfer freiwillige Meldungen nach Liste der FNR (2017): realisiert (+ auf dem Weg)	n	17+11	139+46
Beschäftigte durch Bioenergie (Bruttobeschäftigung) 2013 (2014 in D: 119 900; O'Sullivan et al. 2015)	n	16 110	126 410
Beschäftigte durch Biogas 2013 (2014: 48 300 in D; O'Sullivan et al. 2015)	n	9890	49 190
Beschäftigte durch Biomasse-Kleinanlagen 2014 (O'Sullivan et al. 2015)	n	?	25 400
Beschaftigte durch Biomasse-Heiz-/Kraftwerke 2014 (O'Sullivan et al. 2015)	n	?	23 100
Beschädtigte durch Biokraftstoffe 2013 (2014 in D: 23 100; O'Sullivan et al. 2015)	n	2280	25 620
Investionen in die Errichtung von Bioenergieanlagen für Strom und Wärme im Jahr 2016 (BMWi 2017; 1,38 Mrd. € in Wärme, 0,26 in Strom)	Mrd. €/Jahr	?	1,64
Wirtschaftliche Impulse aus dem Betrieb von Bioenergieanlagen für Strom, Wärme, Kraftstoff 2016 (BMWi 2017; 3,08 Mrd. € in Wärme, 4,67 in Strom)	Mrd. €/Jahr	?	10,37
Vermiedene Treibhausgasemissionen in Kohlenstoffdioxidäquivalenten durch energetische Nutzung von Biomasse im Jahr 2016 (BMWi 2017)	t CO_2-äqu./Jahr	?	63 984 000

NS = Niedersachen, D = Deutschland, EE = Erneuerbare Energien

Die Wärmeproduktion aus Biomasse (einschließlich Abfall) in Deutschland betrug 2016 148 053 GWh/Jahr, davon 85,3 % aus fester Biomasse und 13,3 % aus Biogas (inklusive Klär- und Deponiegas), insbesondere aus KWK-Anlagen. Die Haushalte waren mit 67 986 GWh/Jahr die größten Verbraucher von biogenen Festbrennstoffen, gefolgt von Industrie und Gewerbe mit zusammen 39.000 GWh/Jahr. Scheitholzöfen und -kamine produzierten 2011 in Deutschland 57.200 GWh/Jahr, Pelletheizungen im Jahr 2015 5910 GWh/Jahr (in Niedersachsen 360 GWh/Jahr). In Deutschland gab es 2015 rund 15 Mio. Scheitholzöfen und -kamine, in Niedersachsen 1,0 Mio. 2014 betrug die Anzahl von Holzpelletfeuerungen <1 MW in Deutschland 390.500, in Niedersachsen nur 19 055. Für 2017 werden für Deutschland 454.900 Pelletfeuerungen mit einer Wärmebereistellung von 8865 GWh/Jahr prognostiziert (Deutsches Pelletinstitut 2017). In Niedersachsen kommt eine Holzheizanlage auf etwa 7,5 Einwohner (3N 2016), in Deutschland auf 5,5 Einwohner.

2015 lag der gesamte Holzverbrauch der Holzfeuerungskleinanlagen <1 MW in Niedersachsen bei etwa 3,0 Mio. Festmetern (entspricht etwa 2 Mio. t), wovon 77 % in Scheitholz-Feuerungen, 16 % in Holzhackschnitzel-Feuerungen und 7 % in Pellet-Feuerungen verbrannt wurden (3N 2016). 3N (2016) schätzt ab, dass in Niedersachsen das Holz für die kleinen Anlagen zu 77 % direkt aus dem Wald stammt, 9 % aus der Landschaftpflege und 2 % aus dem Gartenbereich. 14 % wurden als Nebenprodukt der Holzverarbeitung oder nach einer stofflichen Nutzung gewonnen. Holzfeuerungsanlagen >1 MW verbrauchten 2015 zusätzlich etwa 2,4 Mio. Festmeter. In den niedersächsischen Großholzfeuerungsanlagen >1 MW dagegen stammten 2013 65 % des Brennstoffes aus dem Wald und der Landschaftspflege, 24 % waren Altholz und 11 % Säge- und Industrierestholz (3N 2014b).

Zusammengefasst wurden in Niedersachsen 2015 etwa 5,4 Festmeter Holz energetisch verbraucht, wovon nur 3,9 Mio. Festmeter direkt als Energieholz gewonnen wurden. Zum Vergleich: In Niedersachsen wachsen jährlich 12,3 Mio. Festmeter Holz nach, von denen 9,5 Mio. zur Nutzung zur Verfügung stehen. Nach Zahlen aus AEE (2013) könnte die gewinnbare Holzmenge (Waldrestholz+Holzuwachs) aus dem Wald um das 2,6-fache gesteigert werden, noch vergrößerbar um bisher nicht benutzte Potentiale von Altholz und Industrierestholz.

Insgesamt wurden durch die Holzverbrennung etwa pro Jahr 12 100 GWh fossiler Energieträger in Niedersachsen eingespart und somit etwa 2,88 Mio. t CO_2-Emissionen vermieden (3N 2016).

In Tabelle 1-2 nicht aufgeführt sind Anlagen zur Strohverbrennung, von denen es unserem Wissen nach in Niedersachsen keine gibt, obwohl das Strohpotential in Niedersachsen 8,4 % aller Bioenergiepotentiale ausmacht, in Deutschland 7,2 %. Strohverbrennung für energetische Zwecke ist z.B. in Dänemark sehr verbreitet.

Der Menge des Biokraftstoffes (bisher meist auf Basis von Pflanzenöl/Biodiesel bzw. Ethanol) ist geregelt durch die EU-Richtlinie 2009/28/EG (Erneuerbare-Energien-Richtlinie) und dem Bioktaftstoffquotengesetz. Der Anteil

der Biokraftstoffe am Kraftstoffverbrauch betrug 2011 rund 3 % in Niedersachsen und 5,5 % in Deutschland (2016: 4,6 %), vorwiegend verwendet als Beimischungen von Biodiesel und Bioäthanol zu den fossilen Treibstoffen.

Insgesamt gab es im Jahr 2013 auf allen erneuerbaren Energiesektoren in Niedersachsen 127 Energiegenossenschaften (in Deutschland 888) (AEE 2017). Die Bruttobeschäftigung im Bereich Bioenergie lag 2013 bei 16 110 Arbeitsplätzen in Niedersachsen und 126 410 in Deutschland (2014 Abnahme auf 119 990 vor allem wegen Verminderung der Förderung im EEG 2014), wobei in Niedersachsen 61 % (in Deutschland 39 %) der Arbeitsplätze im Bereich Biogas lagen. Die wirtschaftlichen Impulse aus dem Betrieb aller deutschen Bioenergieanlagen für Strom, Wärme und Kraftstoffe werden für 2015 auf 10,4 Mrd. € geschätzt bei Investitionen von 1,64 Mrd. € für Strom und Wärme. Die durch Bioenergieeinsatz vermiedenen Treibhausgase in Deutschland beliefen sich 2016 auf etwa 62 Mio. t Kohlenstoffdioxidäquivalente pro Jahr, das sind pro Einwohner 0,78 t. Durch den Einsatz aller erneuerbaren Energieträger wurden 2016 161 Mio. t Emissionen (BMWi 2017) entsprechend 1,96 t/Einwohner eingespart. Zum Vergleich: Die auf einen Einwohner umgerechnete Emission belief sich 2016 in Deutschland auf 11,0 t, was die Dringlichkeit weitere Minderungsmaßnahmen offenbart.

1.2.2 Politische Aussagen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien (speziell Bioenergie) in Niedersachsen und Deutschland

Im Koalitionsvertrag der rotgrünen Regierung in Niedersachsen wird bezüglich der energetischen Entwicklung der Schwerpunkt Energieeffizienz, stärkere Verlagerung auf erneuerbare Energien (Schwerpunkt Windenergie, aber auch Solar und Geothermie), Ausbau der Netzinfrastruktur und Energiespeicherung betont unter starker Beteiligung der Gesellschaft (SPD & Bündnis 90/Die Grünen 2013). Forschung und Innovation im Bereich der Erneuerbaren Energien sollen gestärkt werden. *„Der Umbau der Energieversorgung in Niedersachsen auf einhundert Prozent erneuerbare Energiequellen ist eine technische, soziale und gesellschaftspolitische Herausforderung ohne Beispiel."* …. *„Das Gemeinschaftswerk Energiewende muss nach Überzeugung der rot-grünen Koalition von einem organisierten Kommunikationsprozess begleitet werden, der den Dialog mit dem bürgerschaftlichen Engagement, den Wirtschafts- und Sozialpartnern sowie den Nichtregierungsorganisationen sicherstellt und die Partner miteinander vernetzt."*

„Eine weitgehend dezentral ausgerichtete Energiewende wird auch Veränderungen in Natur und Landschaft zur Folge haben, die Akzeptanz in der Bevölkerung erfordern. Die rot-grüne Koalition verfolgt den Anspruch, dass Prozessabläufe, Zielsetzungen und Entscheidungsfindungen transparent und nachvollziehbar für die Menschen in Niedersachsen ausgestaltet werden." …. *„Die rotgrüne Koalition … setzt sich auf Bundesebene für ein neues Infrastrukturplanungsrecht ein, das den Dialog mit den Betroffenen vor Ort in den Mittelpunkt stellt und Lösungen im fairen Interessenausgleich sucht."* ….

„Die rot-grüne Koalition unterstützt die aktive Einbindung der Bürgerinnen und Bürger in die Energiewende, z.B. durch Gründung von Energiegenossenschaften zur Nutzung der Erneuer-

baren Energien Wind und Sonne sowie durch Anwendung moderner Technologien der Kraftwärmekopplung oder Wasser- und Windkraftwerken. Ebenso unterstützt werden Energieeffizienz- und Sparmaßnahmen. Genossenschaftliche Modelle und wirtschaftliche Vereine sollen zugleich Wertschöpfung und Entwicklung des ländlichen Raumes stärken." …. *„Die rot-grüne Koalition unterstützt den Energiestrukturwechsel hin zur Dezentralität…."*

Der Bioenergie steht die Koalition skeptisch gegenüber: *„Durch eine Bundesratsinitiative zum Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) sollen falsche Anreize beim Energiepflanzenanbau abgebaut werden."* …. *„Die rot-grüne Koalition* möchte *im EEG die Förderung nachwachsender Rohstoffe zugunsten von Reststoffen deutlich reduzieren und mehr Vielfalt bei der Energiepflanzennutzung vorschreiben."* …. *„(*Die Koalition) *lehnt den weiteren Zubau von Biogasanlagen in der bisherigen Form ab. Die Belastungen von Natur, Grundwasser und Landschaft – so durch Vermaisung und Güllefrachten – zeigen, dass eine Veränderung der Rahmenbedingungen mit z.B. einer vernünftigen Fruchtfolge und einer sinnvollen Wärmenutzung erfolgen muss. Möglichkeiten zur Korrektur von Fehlentwicklungen mit den Steuerungsinstrumenten des Landes wie der Einstufung der Gärreste als Wirtschaftsdünger müssen dringend geprüft werden. Als erster Schritt wird die Errichtung von Biogasanlagen in allen Schutzzonen von Wasserschutzgebieten untersagt."*

Auf der Webseite des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016a), datiert auf den 16.2.2016, werden diese Aussagen relativiert und teilweise präzisiert. Es wird auf die besondere Rolle wie auch auf die Grenzen der Energie aus Biomasse hingewiesen: „…*sie ist lager- und in der Regel speicherfähig …. ist prinzipiell geeignet, einen Teil der Grundlast beim Energieverbrauch zu decken*". *„Für ein großes Flächenland wie Niedersachsen mit seiner hochproduktiven Landwirtschaft ist die Biomassenutzung hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Klimaschutz, die Ressourcenschonung und nicht zuletzt als Einkommensalternative für Landwirte von großer Bedeutung. Der weitere Bau von Biogasanlagen stößt allerdings an seine Grenzen. Einerseits stehen nur begrenzte Flächen für die in Konkurrenz stehende Nahrungsmittel- und Energiepflanzenproduktion zur Verfügung. Andererseits kann eine weitere Ausweitung der Energiepflanzenproduktion zu mehr Belastungen für Natur und Gewässer führen."*

„Ziel ist es, sehr differenzierte Pflanzenarten und Fruchtfolgen mit Mais, Sonnenblumen, Hirse, Wintergetreide und Leguminosen einzusetzen, und damit die bestehenden Fruchtfolgen zu erweitern. Hier bietet sich die Chance, auch beim Energiepflanzenanbau Auswirkungen auf die Artenvielfalt zu minimieren. Darüber hinaus ist es erforderlich, den Einsatz von landwirtschaftlichen Nebenprodukten und biogenen Abfällen, soweit sie geeignet sind, zu verstärken."

Das vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016b) initiierte Gutachten „Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050" geht in einem Szenarium mit Steigerung der nutzbaren Effizienzpotentiale und des Bevölkerungsrückganges in Niedersachsen davon aus, dass gegenüber heute der Endenergieverbrauch um 47 % sinkt und der Endenergiebedarf von 182 TWh zu 100 % aus erneuerbaren Energien befriedigt werden kann, davon 19,4 % aus Bioenergie: *„Als speicherbarer Energieträger mit hoher Energiedichte kommt ihr (der Biomasse) zur Substitution fossiler Brennstoffe und als Kohlenstoff-Quelle (CO_2 aus Biogas und Abgas) zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus elektrolytisch erzeugtem*

Wasserstoff allerdings eine hohe Bedeutung zu, besonders für mobile Anwendungen und im Prozesswärmebereich." …. *„Für Energiepflanzenanbau (Biogas, Biokraftstoffe, feste Biomasse) sind 7,9 % der Landwirtschaftsfläche Niedersachsens zur Selbstversorgung und weitere 3,0 % zum Export gemäß Solidaransatz vorgesehen."*…. *„Der Anteil der Energiepflanzenanbaufläche an der Landwirtschaftsfläche geht somit von 12,9 % auf 10,9 % leicht zurück."*

„Für das vollständig auf erneuerbaren Energien beruhende Szenario resultieren unter den angenommenen Randbedingungen Strombereitstellungskosten von 11,6 Cent/kWh im Jahr 2050." Würde die zukünftige Stromversorgung weiterhin zum größeren Teil auf fossilen Energieträgern beruhen, würden die Strombereitstellungskosten dagegen zwischen 11,3 bis 18,1 Cent/kWh liegen. *„Dabei ist zu beachten, dass in beiden Szenarien die Versorgung sämtlicher Anwendungsbereiche [Wärme, Prozesswärme, Mobilität und KLIK (= Kraft, Licht, Informations- und Kommunikationstechnologien, Kälte)] nahezu vollständig (zu etwa 94 Prozent) elektrisch erfolgt.*" In Niedersachsen würden 2050 die Treibhausgasemissionen im 100 % EE-Szenario um 87,5 % gegenüber heute sinken. Aufbauend auf diesem Szenarium wurde ein zweites Szenarium für 80% verminderte Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 berechnet, welches aber hier nicht vertieft werden soll.

In einem Zusatzgutachten für das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016c) ist für das Zieljahr 2050 im Szenarium 100 % Erneuerbare Energien analog zum Hauptgutachten Biomasse als Basis für die Stromgewinnung nicht vorgesehen. Die mögliche Funktion speziell des Biogases als variabler Strompuffer findet keinen Eingang, vielmehr wird hier auf andere Speichertypen (Batterie-, Wasserstoffs-, Pumpspeicher etc.) abgehoben.

Die Leitgedanken im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie neu konzipierten Erneuerbaren-Energien-Gesetz EEG 2017 sind a) die angebliche Kosteneffizienz (Hinweis: bei fosssilen Energieträgern und Atomenergie werden die Umweltkosten nicht einbezogen), b) die Akteursvielfalt (die sehr groß war, aber durch Ausschreibungen zunehmend schrumpfen wird; s. unten), c) Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und d) das Einhalten des zeitlichen Ausbaukorridors der erneuerbaren Energien (was allerdings von vielen Experten beweifelt wird). In Deutschland wurden 2016 immerhin 59 % des gesamten Endenergieverbrauchs der erneuerbaren Energiequellen aus Biomasse erzeugt (nach Daten in Tab. 1.2; BMWi 2017). Zwar soll die Nutzung der Bioenergie auf den Sektoren Strom, Wärme und Kraftstoff weiter ausgebaut und die Effizienz der Nutzung erhöht werden, jedoch wird gleichzeitig auf die Begrenztheit der technischen Potentiale und die hohen Kosten verwiesen. Die Potentiale von biogener Rest- und Abfallstoffe sollen insbesondere im Strombereich mehr erschlossen werden, um Nutzungskonflikte zu vermeiden (Kommentar: Rest- und Abfallstoffe sind jedoch nur extrem begrenzt verfügbar). Die im EEG 2017 vorgesehenen Ausbaukorridore der Bundesregierung für die Energie aus Biogas (BMWi 2016; EEG 2017) bedeuten einen erheblichen Rückschritt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die ersten alten Biogasanlagen in wenigen Jahren vom Netz gehen müssen und kaum noch neue entstehen. Für Strom aus Biomasse ist in den Jahren 2017-2019 ein jährlicher

Bruttozubau von nur 150 MW pro Jahr erlaubt, für 2020-2022 von 200 MW pro Jahr. Biomasseneuanlagen >150 kW und Bestandsanlagen mit einer Anschlussförderung unterliegen Flexibilitätsanforderungen, um den Strom bedarfsgerecht zu produzieren. Biogasanlagen erhalten nur für die Hälfte der Stunden eines Jahres eine Förderung. Dies soll bewirken, dass Biogasanlagen Strom in Zeiten großer Nachfrage produzieren, wenn also der Strompreis hoch ist. Bereits 2015 wurden im Bereich Stromerzeugung aus Biogas nur 100 MW Leistung neu installiert; mehr als 90 % davon dienten der Flexibilisierung der Anlagen, stellten also keinen echten Zubau dar. „*Wesentliches Instrument für den Wärme-/Kältebereich ist darüber hinaus das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG), welches durch das Marktanreizprogramm (MAP) … konkretisiert wird. Der Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehrsbereich schließlich wird weitgehend durch das Biokraftstoffquotengesetz bestimmt.*“ (BMWi, 2016). Im EEG (2017) wird zwar die Förderung der Akteursvielfalt für die Umsetzung von EE-Projekten betont (Stichwort Bürgerenergie). Diese Vielfalt war aber bereits vor dieser Gesetzes-Novelle Realität und wird durch die geforderten Ausschreibeverfahren eher behindert als gestärkt.

Dennoch wird die Bioenergieforschung durch verschiedene Ministerien, insbesondere durch das BMEL, weiterhin mit Fördermitteln (wenn auch mit abnehmenden Tendenz) unterstützt (BMWi 2017b): 24,45 Mio. € flossen 2016 aus dem BMEL in Neubewilligungen und 28,05 Mio. € in bereits laufende Forschungsvorhaben. „*Das Förderprogramm umfasst auch Maßnahmen außerhalb der Energieforschung unter anderem zu Anbau und Züchtung, zur stofflichen Nutzung, zur internationalen Zusammenar*bei*t und zum gesellschaftlichen Dialog.*“ Neue Förderschwerpunkte sind a) Verbesssrung der Treibhausgasbilanzen bei der Bioenergiegewinnung, b) „*Optimierung der Integration der Bioenergie in regionale und überrgionale Energie-(infrastruktur-)systeme (Wärme, Strom, Mobilität) mit dem Ziel der Systemstabilität und der Energieeffizienz*“.

In kleinerem Umfange unterstützt *„das BMWi ... Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte für eine technisch, ökologisch und ökonomisch optimierte energetische Biomassenutzung, die biogene Reststoffe aus der Abfall- sowie Land- und Forstwirtschaft konsequent einsetzt, Wirkungsgrade steigert oder neue Koppel- beziehungsweise Kaskadennutzungspfade erschließt. Im Mittelpunkt stehen Wärme- und Stromerzeugung, Kraft-Wärme-Kopplung, Flexibilisierung und die Integration bioenergetischer Anwendungen in das Gesamtsystem.“ (BMWi 2017b).*

Das BMBF fördert Forschung im Bereich „*Bereitstellung von Netzdienstleistungen dar, um die hohe Flexibilität der bioenergetischen Stromerzeugung für das Gesamtsystem zu erschließen.*“ Ziel dieser Föderung ist die Erforschung des flexibleren Betriebes von Biogasanlagen für eine bessere Bereitstellung von Ausgleichsenergie in einem fluktuierenden Energiesystem. Zusätzlich gefördert wird die Aufreinigung von Biogas in Biomethan und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus verschiedenen Biomassen, wodurch eine Gewinnung von Biokraftstoffen möglich erscheint.

Das BMBF unterstützte ab 2013 in 30 Vorhaben mit über 30 Mio. € Fördermittel Forschung für eine Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems. „*Forschungsschwerpunkt ist zum einen die Darstellung und Bewertung*

von Entwicklungsoptionen des Energiesystems einschließlich ökonomischer Szenarien. Ein weiterer wichtiger Ansatz ist die Analyse der gesellschaftlichen Voraussetzungen für die Akzeptanz der Transformation und die aktive Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern. Genauso wichtig ist darüber hinaus der Ordnungsrahmen (Governance) von Transformationsprozessen, einschließlich ökonomischer Instrumente." (BMWi 2017b).

Die deutschen Bundesländer vergaben 2015 für die Erforschung der regenerativen Energien knapp 131 Mio. €, davon 21,5 Mio. € für die Biomasseenergieforschung (Jessen 2016). In Niedersachsen entfielen auf die Bioenergieforschung nur 448.000 €.

1.2.3 Problembeschreibung auf lokaler bis globaler Ebene

Generell bringt die Nutzung der von Pflanzen für energetische Zwecke positive und negative Momente mit sich. Gute Aspekte sind beispielsweise die Diversifizierung bei der Bereitstellung erneuerbaren Energien in Form von Gas, Flüssigkeit oder Feststoff, die zudem speicherbar und bedarfsgerecht eingesetzt werden kann. Die Nutzung von Energiepflanzen reduziert, wenn richtig eingesetzt, die Treibhausgasemissionen, stärkt die lokale Land- und Forstwirtschaft wie auch die Außenhandelsbilanz. Geschickter Anbau von Energiepflanzen kann der Bodenerosion und der Monotonisierung des Landschaftsbildes entgegenwirken und die Artenvielfalt und die Attraktivität der Landschaft erhöhen. Durch gezielten Anbau geeigneter mehrjähriger Energiepflanzen in Gebieten mit verlassenen, unternutzten oder degradierten Gebieten kann durch Festlegung von Kohlenstoff in der Biomasse und im Boden Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre fixiert werden und sich die Treibhausgasbilanz verbessern bei gleichzeitiger Produktion von Bioenergie, ohne dass eine Konkurrenz zur Nahrungsmittel- und Nutzpflanzenproduktion entsteht (Kampman & Fritsche 2010).

Bioenergieerzeugung kann, wenn falsch betrieben, aber auch Treibhausgasemissionen z.B. von Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas verstärken, zum Abbau von Biodiversität durch Verstärkung von Monokulturen führen, Böden und Wasser z.B. durch Erosion und Eutrophierung überbeanspruchen und in Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmitteln und zur stofflichen Nutzung von Biomasse treten. Es können direkte Landnutzungsänderungen durch Beseitigung von Wald oder Grünland eintreten, meist verbunden mit einer erheblichen Freisetzung von Kohlenstoffdioxid durch Oxidation des organischen Materials der humusreichen Böden und der Pflanzen. Vor allem in tropischen und subtropischen Ländern können auch indirekte Landnutzungen eintreten, wenn z. B. Energiepflanzen wie Zuckerrohr oder Ölpalmen vorher dort produzierte Nahrungsmittelpflanzen in Waldgebiete oder Savannen verdrängen und es dort zu CO_2-Freisetzung kommt.

Diese Pros und Kons zeigen, dass nur eine ausgewogene, der jeweiligen Landschaft und den jeweiligen Klimabedingungen angepasste, ökologische und soziale Aspekte beachtende Bioenergieproduktion stattfinden sollte. Diese Aspekte werden in den folgenden Kapiteln in Teil 2 und 3 vertieft.

Literatur

3N Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe (2014a). *Biogas in Niedersachsen - Inventur 2014*. 32 S. Gesichtet am 21.5.2015: http://www.3-n.info/download.php?file=pdf_files/InfomaterialDownloadsBiogas/biogasinventur_niedersachsen_2014.pdf

3N Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe (2014b). *Feuerstättenzählung Niedersachsen 2013*. 26 S. Gesichtet am 2.5.2016: http://3-n.info/media/4_Downloads/pdf_WssnSrvc_Srvc_Fstbrnnstff_FSZNds_2013.pdf

3N Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe (2016). *Feuerstättenzählung Niedersachsen 2015*. 26 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://3-n.info/media/4_Downloads/pdf_WssnSrvc_Srvc_Fstbrnnstff_FSZNds_2015.pdf

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien 2013). *Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern.* 114 S. Einzelkapitel abrufbar unter: https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/broschueren/potenzialatlas-bioenergie-in-den-bundeslaendern (gesichtet am 23.4.2017)

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien 2014; Hrsg.). *Holzenergie in Deutschland - Status Quo und Potenziale.* Renews Spezial, Sonderausgabe Febr. 2014, 26 S. Gesichtet am 29.4.2016: https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/317.Renews_Spezial_Holzenergie_Japan_DE_Mar14.pdf

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien 2016). *Bundesländer mit neuer Energie - Jahresreport Föderal Erneuerbar 2016/17*. 216 S. Einzelkapitel der Länder abrufbar unter: https://www.foederal-erneuerbar.de/bundeslaender-mit-neuer-energie-statusreport-foederal-erneuerbar-2016 (gesichtet am 19.12.2016)

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien 2017). *Bundesländer-Übersicht zu Erneuerbaren Energien - Bioenergie.* Gesichtet am 23.4.2017: https://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/NI%7CD/kategorie/bioenergie

BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2016). *Energie-Info - Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken*. 85 S. Gesichtet am 30.4.2017: https://www.bdew.de/internet.nsf/res/7BD63123F7C9A76BC1257F61005AA45F/$file/160218_Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG_2016_final.pdf

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016). *Erneuerbare Energien in Deutschland - Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2015*. 75 S. Stand Sept. 2016. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=6

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.* Stand Febr. 2017. 45 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=12

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017b). *Bundesbericht Energieforschung 2017 – Forschungsförderung für die Energiewende.* 60 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bundesbericht-energieforschung-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=14

Deutsches Pelletinstitut (2017). *Pelletfeuerungen/Wärmebereitstellung in Deutschland 2008-2017.* Gesichtet am 30.4.2017: http://depi.de/media/filebase/files/infothek/pdf/Pelletfeuerung_Waerme.pdf

EEG (Erneuerbares-Energien-Gesetz 2014). *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Vom 1. August 2014.* Gesichtet am 30.4.2017: http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesetz-fuer-den-ausbau-erneuerbarer-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=1

EEG (Erneuerbares-Energien-Gesetz 2017). *Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rech ts der erneuerbaren Energien. Vom 13. Oktober 2016.* Bundesgesetzblatt Jahrgang 2016 Teil I Nr. 49, ausgegeben zu Bonn am 18. Oktober 2016. Gesichtet am 4.1.2017: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl116s2258.pdf%27%5D__1483554991380

Fachverband Biogas e.V. (2016). *Branchenzahlen 2015 und Prognose der Branchenentwicklung 2016.* Stand Juni 2016. 4 S. Gesichtet am 4.1.2017: http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/16-09-23_Biogas_Branchenzahlen-2015_Prognose-2016.pdf

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016). *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2016.* 52 S. Gesichtet am 28.11.2016: http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_20162.pdf

FNR (Fachagentur Nachsende Rohstoffe 2017). *Wege zum Bioenergiedorf.* Gesichtet am 2.2.2017: http://bioenergiedorf.fnr.de/karten/bioenergiekommunen/

Kampman, B. & Fritsche U.R. (2010). *BUBE: Better Use of Biomass for Energy - Background Report to the Position Paper of IEA RETD and IEA Bioenergy.* Delft/ Darmstadt: CE Delft/Öko-Institut, July 2010, 151 S. Gesichtet am 17.6.2014: http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Better-Use-of-Biomass-for-Energy-Position-Paper.pdf

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016a). *Biomasse*. Datum des Eintrags: 16.2.2016. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.umwelt.niedersachsen.de/umweltbericht/energie/biomasse/biomasse-139394.html

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016b). *Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050* - Gutachten. 326 S.. Gesichtet am 30.4.2017: www.umwelt.niedersachsen.de/download/106468/Szenarien_zur_Energieversorgung_in_Niedersachsen_im_Jahr_2050_-_Gutachten_-_April_2016_.pdf

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016c). *Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050 - Zusatzgutachten zeitlich höher aufgelöster Szenarien.* 6.10.2016. 120 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/112078/Zusatzgutachten_zu_den_Energieszenarien_2016.pdf

O'Sullivan, M., Lehr, U. & Edler, D. (2015). *Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland und verringerte fossile Brennstoffimporte durch erneuerbare Energien und Energieeffizienz.* 19 S. Gesichtet am 30.4.2017: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bruttobeschaeftigung-durch-erneuerbare-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=13

Jessen, C. (2016). *Förderung der nichtnuklearen Energieforschung durch die Bundesländer.* PtJ Projekträger Jülich, Forschungszentrum Jülich. 9 S. Gesichtet am 30.4.2017: https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_8050/lnderbericht_2015.pdf

Rottmann-Meyer, M.-L., Kralemann, M. & Röther, T. (2014). Stabile Basis für mehr Leistung. *Land & Forst* 50, 43-45.

Scheftelowitz, M., Hennig, C., Beil, M. & Thrän, D. (2015). *Stromerzeugung aus Biomasse* (Vorhaben IIa Biomasse). Zwischenbericht, 161 S. Gesichtet am 30.4.2017: https://www.dbfz.de/fileadmin/eeg_monitoring/berichte/01_Monitoring_ZB_Mai_2015.pdf

Schünemann-Plag, P. (2016). *Aktuelle Situation auf den Biogasanlagen in Niedersachsen.* Biogasforum Niedersachsen, Plenarsitzung 5.4.2016. 32. S. Gesichtet am 15.7.2016: http://www.ml.niedersachsen.de/download/106216/2._Schuenemann-Plag_LWK_Aktuelle_Situation_auf_den_Biogasanlagen_in_Nds..pdf

SPD & Bündnis 90/Die Grünen (2013). *Erneuerung und Zusammenhalt - Nachhaltige Politik für Niedersachsen. Koalitionsvertrag zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Landesverband Niedersachsen, und Bündnis 90/Die Grünen, Landesverband Niedersachsen, für die 17. Wahlperiode des Niedersächsischen Landtages 2013 bis 2018.* 99 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.gruene-niedersachsen.de/fileadmin/docs_lv/downloads/Dokumente/Rot-Gruener_Koalitionsvertrag_Nds_2013_2018_web.pdf

Statistisches Bundesamt (2015). *Statistisches Jahrbuch 2015. Teil 19: Land- und Forstwirtschaft*. 32 S. Gesichtet am 30.4.2017: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/LandForstwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile

1.3 Nachhaltige Produktion und Nutzung – Was bedeutet das für die Bioenergie?

Jens Ibendorf, Hans Ruppert

1.3.1 Nachhaltigkeit und die Anthroposphäre

Selten hatte ein Begriff eine so steile Kariere: Das Wort Nachhaltigkeit ist in aller Munde und wird inzwischen inflationär genutzt auch in vielen Bereichen der Wirtschaft, Wissenschaft, Politik, Gesellschaft etc., die mit der Nachhaltigkeit im Sinne von *Sustainability* (vom Lateinischen sustinere: aufrecht halten, stützen, bewahren, ernähren) oder Zukunftsvorsorge nichts oder nur wenig zu tun haben, sondern nur in dem Sinne ‚längerfristig wirksam' benutzt werden. In diesem Buch wird der Begriff Nachhaltigkeit im Sinne der *Sustainability* verwendet, angereichert um den wichtigen Kontext der Gerechtigkeit und Chancenerhaltung für die heute wie auch zukünftig auf unserem Planeten lebenden Menschen und für den Erhalt unserer Umwelt mit ihren Öksystemen. Es geht letztlich um die langfristige Sicherstellung unserer Lebensgrundlagen zusammen mit denen der Natur, von der wir abhängen.

Loorbach (2007) sieht vor allen Dingen drei Charakteristika für eine nachhaltige Entwicklung: Veränderungen über einen langen Zeitraum; Veränderungen über verschiedene räumliche Ebenen (lokal, regional und global) und verschiedenen Akteuren und eine ausgewogene Entwicklung zwischen ökologischen, ökonomischen und sozialen Werten und Interessen. Kopatz (2013, S. 159) hingegen setzt den Menschen in den Mittelpunkt der Betrachtung: „*Eine Politik der Nachhaltigkeit wird den Menschen in den Mittelpunkt rücken. Es gilt, den Menschen ein gleichermaßen verantwortungsvolles und glückliches Leben zu ermöglichen. Der verantwortungsvolle Umgang mit endlichen Ressourcen und eine kohlenstoffarme Gesellschaft lassen sich allerdings nur durch eine Verbindung von technischen und sozialen Innovationen ins Werk setzen. Erforderlich ist eine Koevolution von Technik und Kultur.*" Im Rahmen nachhaltiger Entwicklung ist es aber notwendig, nicht nur den Menschen in den Fokus zu setzen, sondern auch die Mensch-Tier- und Mensch-Pflanzen-Beziehungen (siehe Achtungsprinzip in Kap. 1.3.2.1).

Aber welche Gründe sprechen dafür, die gesellschaftlichen Bedingungen unseres Schaffens so zu verändern, dass das verantwortungsvolle und glückliche Leben global für die jetzigen und künftigen Generationen erhalten und teilweise verbessert wird? Der Mensch hat es seit der industriellen Revolution geschafft, sich als treibende Kraft innerhalb des Erdsystems zu entwickeln. Die damit verbundenen Umweltwirkungen sind so gravierend, dass ehemals über lange Jahrhunderte bis Jahrtausende stabile natürliche Zustände in wenigen Jahrzehnten verändert werden

und „[…] *die Fähigkeit der Ökosysteme unseres Planeten, künftige Generationen zu versorgen nicht länger als selbstverständlich vorausgesetzt werden kann*" (WBGU 2011, S. 33). Damit bewegen wir uns in einer neuen Epoche, einem vom Menschen dominierten Zeitalter, dem sogenannten Anthropozän (Crutzen 2002; Steffen et al. 2007, WBGU 2011). Die Folgen dieser Dominanz werden langfristig wirken und wurden bereits seit den 1960er Jahren erkannt und flossen in den Industrienationen in zahlreiche Umweltgesetze ein, allerdings ohne das Ausmaß der globalen Stoff- und Energieflüsse, den Verbrauch von Land, Wasser etc. merklich einzuschränken. Einige Umweltbereiche zeigen dementsprechend menschengemachte krisenhafte Entwicklungen: Übernutzung, Kontamination, Degradation und Zerstörung, von Böden, Wäldern, Wasserressourcen und Meeren, die Veränderungen wichtiger biogeochemischer Stoffkreisläufe (z. B. Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorkreisläufe), der Klimawandel und der Verlust an Artenvielfalt. Rockström et al. (2009) und der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU 2011) beschreiben planetare Grenzen, innerhalb derer das Risiko für die menschliche Zivilisation tolerierbar ist. Der WBGU (2011, S. 34) charkterisiert „*planetarische Leitplanken als quantitativ definierbare Schadensgrenzen, deren Überschreitung heute oder in Zukunft intolerable Folgen mit sich brächte, so dass auch großer Nutzen in anderen Bereichen diese Schäden nicht ausgleichen könnten*". Rockström et al. (2009) identifizierten neun physikalische, geochemische und biologische Grenzen (planetary boundaries). Abbildung 1-3 zeigt diese planetarischen Grenzen. Dabei wird deutlich, dass die Grenzen des sicheren Aktionsraumes bei den Indikatoren Biodiversitätsverlust, Klimawandel und Stickstoffeintrag in die Biosphäre bereits überschritten sind. In einer Überarbeitung des Diagramms aus Rockström et al. (2009) durch Steffen et al. (2015) werden zusätzlich zu den genannten Grenzüberschreitungen a) der Phosphoreintrag in die Gewässer (in Ländern mit industrieller Agrarproduktion) als hohes Risiko sowie b) Landsystemveränderungen durch Klima und Landnutzungswandel als steigendes Risko eingestuft.

Die Auswirkungen des Überschreitens dieser Grenzen können global (z. B. Klimawandel) und/oder lokal/regional (z. B. Artenverlust) sein und sind teilweise in ihren Dimensionen noch unklar. Weiterhin sind die verschiedenen Indikatoren und dementsprechend auch deren Grenzen eng miteinander verbunden. Das kann wiederum unvorhersehbare Folgen haben, wenn die Grenzen einzelner Indikatoren überschritten werden. Eine Folge dieses Überschreitens der planetaren Grenzen können sogenannte Kippelemente im Erdsystem sein. Dabei können kleine externe Störungen unumkehrbare und sich selbstverstärkende Prozesse einleiten, die dann weitreichende Umweltwirkungen haben (Lenton et al. 2008).

Im Folgenden werden einige Schlussfolgerungen zusammengefaßt, die sich im Laufe der langfristigen Lehre und Beschäftigung im Bereich der Lehrveranstaltungen Umweltgeowissenschaften herauskristallisierten:

- Wir haben nur 1 Erde!
- Materielles Wachstum geht nicht auf Dauer, da die Erde Grenzen hat (wir brauchen heute bereits 1,5 Erden).
- Der Landnutzungswandel durch den Menschen in den wenigen letzten Jahrhunderten (Abholzung von Wäldern und Umnutzung von Grünland in Weide- und Ackerland) verändert die Erde in gewaltigem Ausmaß, erheblich mehr als alle natürlichen Prozesse nach dem Ende der Eiszeit vor gut 10.000 Jahren.

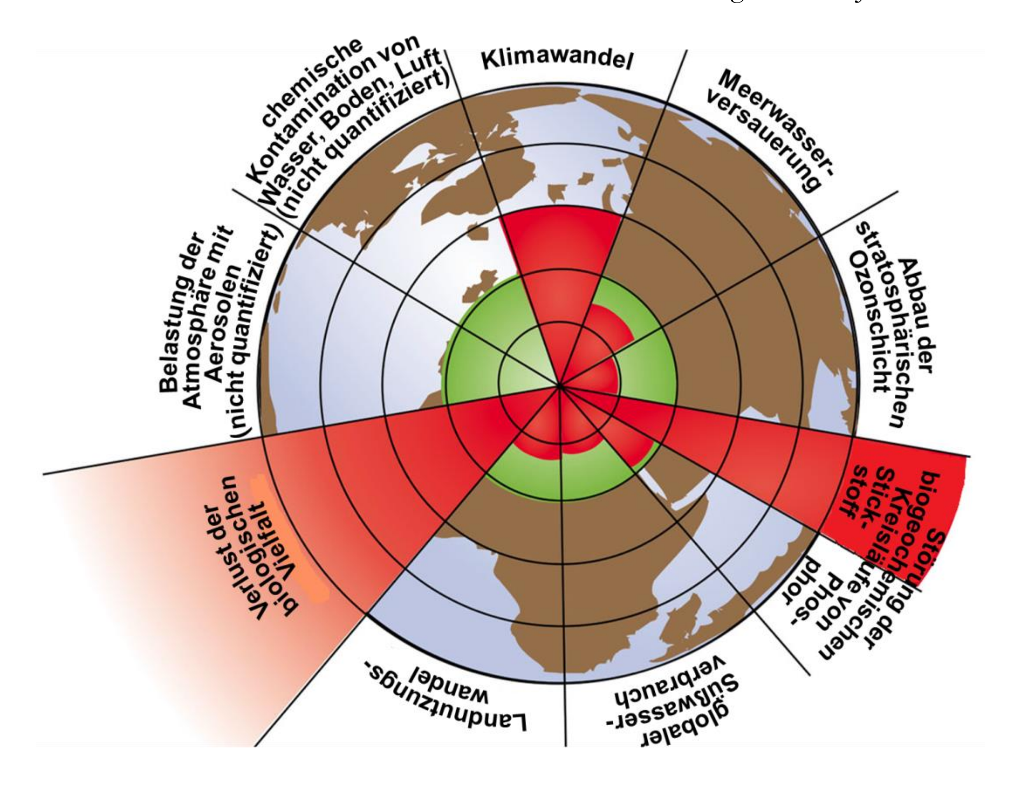


Abbildung 1-3: Abschätzungen der Veränderungen verschiedener Indikatoren für sieben planetarische Grenzen von 1950 bis heute. Die grün schraffierten Bereiche stellen den sicheren Aktionsraum dar (abgwandelte Abbildung von Azote Images/ Stockholm Resilience Centre 2009 und Rockström et al. 2009; eine Überarbeitung erfolgte durch Steffen et al. 2015; s. auch Text).

- Wir schränken massiv die „Benutzbarkeit“ der Erde ein z.B. durch Verschmutzung von Böden, Wasser, Luft und der Biosphäre, durch Klimawandel, Erosion, Versieglung, Artenvernichtung.
- Wir schränken durch diese unnatürlichen Veränderungen die Überlebensfähigkeiten zahlreicher Arten ein, die für funktionierende Ökossysteme lebenswich-

tig sind und für die Entwicklungschancen der Menschheit selbst von großer Bedeutung sind.

- Zusätzlich stecken wir in einem Dilemma wegen zunehmender Rohstoff- und Lebensraumverknappung bei stark steigender Weltbevölkerung mit steigenden Ansprüchen.
- Wir brauchen eine Wirtschaftsweise für eine niederentropische Gesellschaft, also eine Wirtschaftsweise, die aus dem Angebot der Regenerationsfähigkeit der Natur ihre Energie, Stoffe, Nahrung etc. bezieht und die durch natürliche Prozesse über lange Zeiträume enstandene Stoffe wie fossile Energieträger, Erze, Steine etc. nur wenig verbraucht. Grund: Diese sind zumeist sehr begrenzt und werden bei der jetzigen Wirtschaftsweise in wenigen Generationen aufgebraucht werden und damit unwiderruflich verloren gehen, obwohl sie eigentlich auch den späteren Generationen noch zur Verfügung stehen sollten. Die Natur braucht viele zehner Millionen Jahre, um wieder neue Lagerstätten z.B. von Öl, Kohle und Erdgas zu erzeugen.
- Das Problem geht also vom „Homo oeconomicus" aus. Es ist begründet auf einer rein ökonomischen Sichtweise mit zu wenig Einbezug der sozialen und ökologischen Konsequenzen unseres Tuns.

Was müssen wir verändern, um uns mehr den Zukunftsfragen zu stellen? Drängende Elemente eines notwendigen Wandels sind:

- Nachdenken und Konsequenzen ziehen, was unser Tun an der Mitwelt (Mensch und Natur) bewirkt, lokal wie global.
- Disziplinen müssen lernen, mehr **T** – Kompetenz aufzubauen, nämlich aus der tiefen fachlichen Verankerung die breiten, weit über das Fach hinausgehenden Verbundenheiten mit anderen Disziplinen zu suchen. Wir müssen es wagen, die bisherigen disziplinären Ausbildungs- und Denkstränge zu verlassen und zu beginnen, inter- und transdisziplinär zusammenzuwirken und die daraus entstehenden Synergien zu nutzen.
- Die Wissenschaftler haben eine Verpflichtung zur Information, nämlich möglichst objektiv risikoreiche Sachverhalte (auch mit Darstellung der Unsicherheit bei solchen Aussagen) an politische und wirtschaftliche Entscheider wie auch in die Bevölkerung zu vermitteln. Die Wissenschaft muss lernen, aus ihrer fachlichen Kompetenz heraus mehr öffentliche Verantwortung zu tragen.
- Trotz der meist komplexen Zusammenhänge sollte eine verständliche Wissensvermittlung erfolgen, um auch Nichtfachleute in Entscheidungsprozesse integrieren zu können.
- Wege einer verstärkten De-Materialisierung sind anzudenken und zu testen. Effizienzmaßnahmen alleine mit einem „Weiter so" reichen nicht. **Ein vermeidendes Handeln am „*beginning-of-pipe*"** und **nicht ein Reparieren am „*end-of-pipe*"** ist nötig. Hierzu gehört auch die Herstellung langlebiger

Produkte mit niedrigem Ressourcenverbrauch (Energie, Stoffe) bei ihrer Produktion und ihrer Nutzung sowie die Sicherung der Wiederverwendbarkeit der Produkte oder Produktteile. Zusätzliche sind Konzepte zu entwerfen, inwieweit Abfallstoffe als wertvolle Ausgangsprodukte oder Rohstoffe Verwendung finden können, wie es bereits 2002 im „*Cradle to Cradle* (C2C)"-Konzept (sinngemäß „von der Wiege zur Wiege"; Braungart & McDonough 2008.) angedacht ist (z.B. CO_2 aus Vebrennungsanlagen mit Hilfe von Sonnenlicht in Algen- oder Tangbiomasse umwandeln, um hieraus Treibstoffe, Biogas, chemische Ausgangsstoffe, eventuell auch Nahrungs- und Futtermittel zu erzeugen). Es muss allerdings bezweifelt werden, ob generell eine abfallfreie Wirtschaft zu verwirklichen ist. Schon beim Gewinnen eines Metalls aus einem Erz wird eine umweltbelastende Abraumhalde entstehen, da dies weder vom Finanz- wie auch vom Energieaufwand zu vermeiden ist. Das gleiche gilt für das „*urban mining*". Hier ist großer Spielraum und Forschungsbedarf für das Optimieren. Eine 100 prozentige Wiedernutzung von Rest- und Abfallstoffen wird nicht möglich sein, wohl aber eine Annäherung daran.

- Gestaltung und Umsetzung einer neuen Postwachstums-Ökonomie unter Vermeidung von Schäden an der Umwelt und dem Gemeinwesen, um die Möglichkeiten für eine gedeihliche Zukunft nicht einzuschränken.
- Realisierung eines Handelns für intra- und intergenerationale Gerechtigkeit (Verteilung der Ressourcen; Aufbau von Zukunftschancen; Abbau von Folgelasten für die folgenden Generationen).
- Mitwirken am Aufbau von Kooperationen und Koalitionen auf dem Sektor Nachhaltigkeit und Zukunftsvorsorge (lokal und global).
- Keine Kriege.

Wir brauchen nicht nur neue Konzepte, sondern auch neue, von der Breite getragene Wertevorstellungen für die Gestaltung der Zukunft.

Wie gezeigt wurde, überformt der Mensch in vielen Bereichen die natürlichen Prozesse des Systems Erde. Damit sägen wir bildlich gesprochen an dem Ast, auf dem wir sitzen, und entziehen bereits heute existierenden Menschen wie auch späteren Generationen eine stabile Lebensgrundlage. Die Notwendigkeit unser gesamtes gesellschaftliches Wirken so zu verändern, dass die planetarischen Grenzen nicht überschritten werden, wurde bereits vor vielen Jahrzehnten erkannt (vgl. „Grenzen des Wachstums" von Meadows et al. 1972). Der Begriff der Nachhaltigkeit wurde dann durch den Brundtland-Report „Our Common Future" (UN 1987) auf die oberste politische Ebene gehoben. Die entsprechenden Diskussionen waren der Antriebsmotor für die UN-Umweltkonferenz in Rio de Janeiro 1992 und die folgenden Agenda21-Prozesse[1]. Seitdem hat das Thema zwar das politische

[1] Auf die Geschichte und Entwicklung des Begriffes Nachhaltigkeit soll hier nicht weiter eingegangen werden (weitere Erläuterungen unter anderem in Ott & Döring 2009, S. 22ff.).

Parkett erreicht, aber, abgesehen von einigen Ausnahmen, konnte der negative Trend bei den Umweltproblemen nicht gestoppt werden. Im Gegenteil: Die Probleme nahmen zu (IPCC 2013, WBGU 2011 S. 33).

Schaut man nun etwas genauer auf den Begriff ‚Nachhaltigkeit' fällt auf, dass es nirgends eine klare handlungsweisende Definition gibt. Schlagwörter wie inter- und intragenerationale und globale Gerechtigkeit tauchen dabei immer wieder auf, aber so vielfältig wie der Begriff genutzt wird, so unterschiedlich wird er auch definiert und angewendet. Gerade in der Unternehmenskommunikation sieht man sehr gut wie flexibel der Begriff angewandt wird (Binswanger et al. 2013). Immer mehr Unternehmen übernehmen global bis lokal Verantwortung für die Umwelt und die soziale Gerechtigkeit. Teilweise aber verbirgt sich hinter dem Label „*Corporate Social Responsibility*" (CSR) blankes ‚*Greenwashing*', wobei diese Unternehmen häufig weit von einer nachhaltigen Unternehmensausrichtung entfernt sind[2]. Die damit verbundene Verwässerung des Begriffes (nicht nur in der Wirtschaft) führt dazu, dass Nachhaltigkeit teilweise nur noch eine Art Platzhalterfunktion erfüllt und eine Hülle ohne Inhalt wurde (Paech 2006; Ott 2009). Zusammenfassend kann man sagen, dass die Nutzung des Begriffes ‚Nachhaltigkeit' in den letzten 20 Jahren Hochkonjunktur hat, aber die Ressourcenzerstörung und soziale Ungerechtigkeit dadurch nicht verringert werden konnte.

In der Literatur wird unterschieden zwischen schwacher und starker Nachhaltigkeit. „Schwache Nachhaltigkeit" bedeutet, dass unterschiedliche Arten von Kapital (aus den verschiedenen Dimensionen) gegeneinander ersetzbar sind. Das Konzept der „starken Nachhaltigkeit" hingegen lässt keine Substitution zwischen verschiedenen Kapitalarten zu. So versteht auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen das Konzept der *„dauerhaft umweltgerechten Entwicklung"* als ein *„ökologisch fokussiertes Konzept von (im Grundsatz starker) Nachhaltigkeit, bei dem soziale und ökonomische Bezüge zu berücksichtigen sind"* (vgl. dazu auch Ott & Döring 2009).

Dem klassischen Drei-Säulen-Modell, bestehend aus Ökologie, Ökonomie und Sozialem, werden immer mehr dimensionsübergreifende Modelle entgegengestellt (Paech 2006, Schidler 2003, Ott 2009). Ott bezeichnet das DREI-Säulen-Modell gar als den *„großen Weichspüler der Nachhaltigkeitsidee"* (Ott 2009, S. 26). Grund dafür ist a) die Tatsache, dass die Säulen so allgemein formuliert sind, dass alles hineininterpretiert wird, was man sich für die zukünftige Entwicklung wünscht (u. a. Vollbeschäftigung, Wirtschaftswachstum, hohes Steueraufkommen), und b) die offensichtliche Erkenntnis, dass bei dem herkömmlichen Modell keine Gleichrangigkeit der drei Säulen möglich und auch nicht sinnvoll ist (Ott 2009, S. 26; SRU 2008). Die mögliche Gleichrangigkeit wird in der Praxis oftmals ausgehebelt, indem wirt-

[2] Der bekannteste Fall von Greenwashing ist sicher die Imagekampagne von BP. Das Namenskürzel BP steht seit den 1990-er Jahren nicht mehr für ‚*British Petroleum*', sondern ‚*Beyond Petroleum*' (Jenseits von Erdöl). Zusammen mit dem neuen Sonnenlogo wird so der Öffentlichkeit vermittelt, dass BP eine nachhaltige, auf erneuerbare Energien ausgerichtete, Firmenphilosophie betreibt. Der Unfall auf der Ölplattform vor der Küste New Mexicos 2012 aber zeigte noch einmal deutlich, wie die Unternehmenskommunikation und die tatsächliche Unternehmensstrategie auseinanderdriften.

schaftliche Interessen dann doch die wichtigsten Kriterien einer Entscheidung sind (siehe Kap. 3.5 bis 3.7). Somit wäre man wieder bei der schwachen Nachhaltigkeit und substituiert die ökologischen Parameter durch wirtschaftliche Nachhaltigkeitsfaktoren.

Auf der anderen Seite ist das Drei-Säulen-Modell gerade wegen seiner größtmöglichen Anschlussfähigkeit und Flexibilität das Modell mit der höchsten Akzeptanz. Es hat sich nahezu in allen politischen Bereichen durchgesetzt (Ott 2009). Auch in der praktischen Anwendung und Durchsetzung von nachhaltigen Maßnahmen und Konzepten hat das Modell durchaus Vorteile. Bei Bürgerbeteiligungsprozessen und der Anwendung von Bewertungsmodellen (siehe Kap. 2.1.1, 2.2.1, 3.1) und entsprechenden Kriterien kann es vor allen Dingen bezüglich der Verständlichkeit von Vorteil sein, das Drei-Säulenmodell anzuwenden. Die klare Strukturierung entlang der drei Säulen macht einen Kommunikationsprozess vor Ort einfacher.

1.3.2 Prinzipien und Kriterien einer nachhaltigen Bioenergieversorgung

In dem Projekt ‚Bioenergie im Spannungsfeld' wird anlehnend an Ott (2009) und Paech (2006) versucht, das Drei-Säulenmodell[3], mit den entsprechenden Kriterien, in ein übergeordnetes Prinzipienmodell zu integrieren. Ziel des Ganzen ist eine Bewertung verschiedener Biomassekonzepte vor Ort. Dabei sollen die Prinzipien Leitplanken des Handels sein und auch nicht quantifizierbare Aspekte beinhalten. Gerade Fragen der Ethik, Moral und globaler Gerechtigkeit sind schwer quantifizierbar, aber entscheidende Faktoren bei Bioenergieprojekten. Im Rahmen des Projektes wurden sechs Prinzipien herausgearbeitet: zusätzlich zu den drei üblichen Prinzipien Konsistenz, Suffizienz und Effizienz wurden das Achtungs-, Vorsichts-, und Partizipationsprinzip eingeführt. In Abbildung 1-4 sind diese Prinzipien dargestellt. Dabei haben das Achtungs- und Vorsichtsprinzip übergeordnete Funktionen, da sie auf die weiteren Prinzipien einwirken bzw. dort konkretisiert werden. Wie schon der WBGU (2011) feststellte, ist eine notwendige Transformation hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft nur zu stemmen, wenn die notwendigen technologischen Innovationen (siehe Effizienzprinzip) vor allen Dingen mit kulturellen Reformen gekoppelt werden. Eine „*Koevolution von Technik und Kultur*" (Kopatz 2013, S. 159) ist notwendig. Der WBGU (2011, S. 71) schreibt dazu: „*Eine effektive und zugleich demokratisch legitime Umwelt- und Klimapolitik muss ´die Menschen mitnehmen´, also den angestrebten Wandel für große Mehrheiten annehmbar machen (Akzeptanz), sich Zustimmung verschaffen (Legitimation) und ihnen Teilhabe ermöglichen (Partizipation). Diese soziale und politische Mobilisierung kann […] nicht (allein) auf Minimierungs- und Verzichtsziele setzen, die in der Regel Zukunftsängste und Verlustaversionen auslösen. Sie muss*

[3] In diesem Fall ist es ein Vier-Säulen-Modell, denn neben den ökologischen, sozialen und ökonomischen Kriterien werden auch technische Kriterien bewertet.

im Einklang stehen mit Vorstellungen eines guten und gelungenen Lebens, die wiederum weit verbreitet und attraktiv sind.“

Generell können die sechs Prinzipien für alle gesellschaftlichen Felder angewendet werden. In diesem Fall werden sie für die Bioenergie erläutert. Da aber die Bioenergie nur ein Zweig der gesamten land- und forstwirtschaftlichen Produktionskette ist, ist es ebenso notwendig, für die Gesamtsysteme Land- und Forstwirtschaft nachhaltige Strategien zu entwickeln, die besonders die Nahrungs- und Futtermittelindustrie mit einschließen. Die Nutzung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen sollte dabei mit dem Schutz der Ökosysteme kombiniert und mit den gesellschaftlichen Bedürfnissen und Wertvorstellungen in Einklang gebracht werden. Fragen des Klima- und Naturschutzes gehören genauso in diesen Diskurs wie Fragen der Ethik und des Lebenskulturwandels.

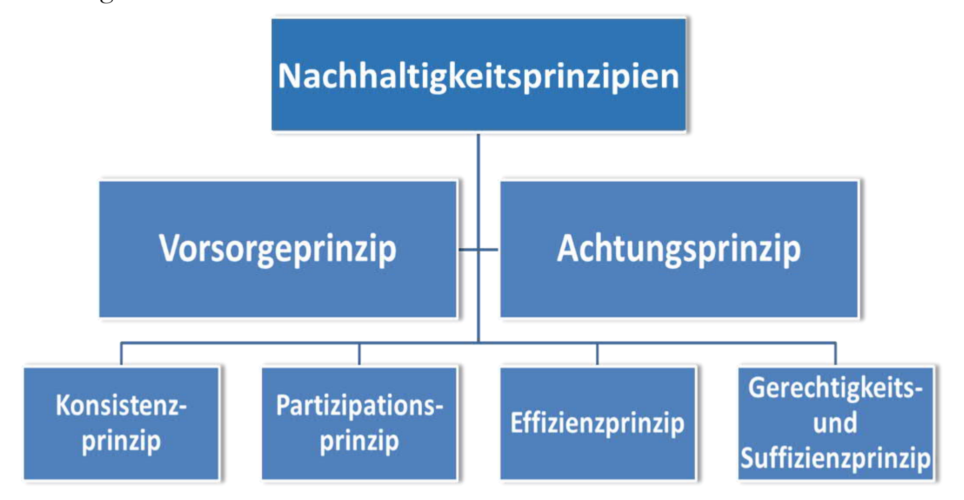


Abbildung 1-4: Nachhaltigkeitsprinzipien (aus: Positionspapier des IZNEs 2012 „Nachhaltige Bioenergieentwicklung“)

Wie schon Jordan (2012) feststellte, ist gerade bei der energetischen Nutzung von Biomasse großer Wert darauf zu legen, dass alle Aspekte der gesamten Produktions- und Nutzungskette bezüglich ihrer Nachhaltigkeit beachtet werden. Ein einfacher Austausch fossiler durch biogene Energieträger birgt gar die Gefahr, dass zusätzliche ökologische Probleme erzeugt werden und eine Bioenergienutzung aus Gründen des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit ad absurdum geführt wird. Beste Beispiele sind die Brandrodungen für Palmölplantagen im Regenwald auf Sumatra, um mit Palmöl die Bio-Kraftstoffproduktion in Europa zu unterstützen (Jordan 2012, S. 123).

Erst die Umstellung des Gesamtsystems, bestehend aus Produktion, Konversion und Nutzung, führt zu einer nachhaltigen Bioenergiestrategie. Vereinzelte Veränderungen z. B. beim Anbau von Energiepflanzen bewirken nur kosmetische Verbesserungen aber noch keine wirkliche nachhaltige Transformation. Abbildung

1-5 zeigt auch die Notwendigkeit, die Bioenergieschiene in ein nachhaltiges Gesamtenergiesystem zu integrieren, vor allen Dingen, um das Zusammenspiel zwischen den anderen nicht-kontinuierlich erzeugenden erneuerbaren Energien (Wind- und Solarenergie) zu ermöglichen. Nicht nur für die Etablierung der einzelnen Energiequellen muss eine Nachhaltigkeitsstrategie angewendet werden, sondern auch für die gesamte Überführung des fossilen in ein regeneratives Energiesystem. Dieses Gesamtsystem muss sich dementsprechend den Gegebenheiten zur Produktion der erneuerbaren Energien anpassen (SRU 2013, S. 20f; Jordan 2012, S. 110f).

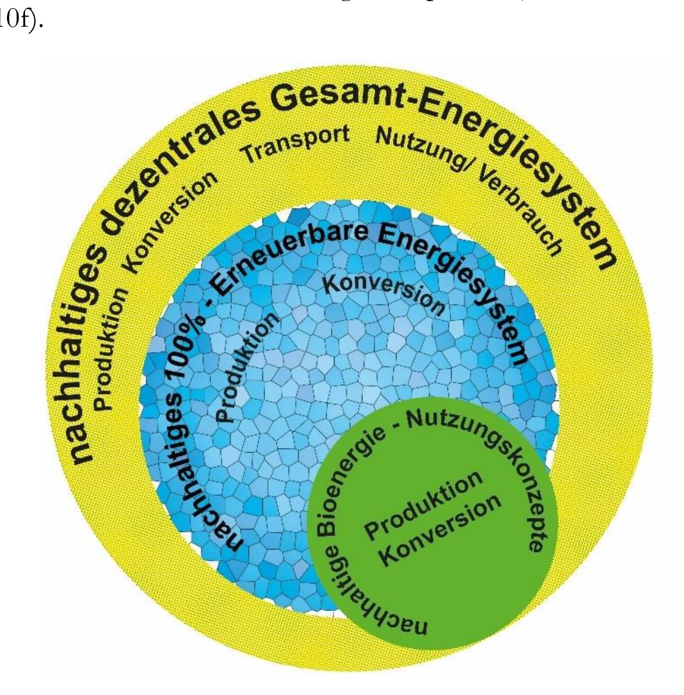


Abbildung 1-5: Integration einer nachhaltigen Bioenergienutzung in ein nachhaltiges regeneratives Gesamt-Energiesystem basierend auf der Produktion, Konversion und Nutzung von unterschiedlichen erneuerbaren Energiequellen

Vordringlich ist, spezifische, räumlich angepasste Bioenergiekonzepte zu erarbeiten, bei denen die regionalen Besonderheiten, die land- und forstwirtschaftlichen Potenziale und der bisherige Ausbaugrad der Bioenergie mit einfließen, damit Fehlentwicklungen abgestellt und zukünftig vermieden werden. Diese Konzepte basieren auf der bisherigen Struktur der Landwirtschaft mit ihren Anteilen an Acker- und Viehhaltungsbetrieben und den natürlichen Standortbedingungen (Bodengüte, Wasserverfügarbeit, lokales Klima). Wegen der unterschiedlichen räumlichen aber auch finanziellen Ausgangssituationen an den jeweiligen Standorten wird ein nachhaltiges Konzept für einen möglichen Energiepflanzenausbau in den Regionen und Landkreisen immer unterschiedlich ausfallen. Dementsprechend sind die verschiedenen räumlichen Ebenen bei der Ausgestaltung der Bioenergiekon-

zepte ausschlaggebend (Multi-Ebenen-Konzept). Steuerungs- und Gestaltungsmöglichkeiten sollten auf der regionalen wie auf der lokalen Ebene differenziert und genutzt werden (siehe Kap. 4.1). Erst ein Zusammenspiel dieser verschiedenen Möglichkeiten, abgestimmt mit den entsprechenden Akteuren, kann eine nachhaltige Bioenergieentwicklung ermöglichen. Dabei ist, wie schon erwähnt, ebenfalls ein Zusammenwirken mit den anderen Erneuerbaren Energien auf den entsprechenden räumlichen Ebenen notwendig. Neben den lokalen und regionalen Ebenen darf die globale Perspektive einer Bioenergieentwicklung gemäß Nachhaltigkeitskriterien keinesfalls vernachlässigt werden (s. Kap. 1.1).

Die Umsetzung von Bioenergiekonzepten bedarf der Integration der Bevölkerung und die Beteiligung der relevanten Akteure aus Politik, Verwaltung, Landwirtschaft, Naturschutz, Wasserwirtschaft usw. (siehe Kap. 1.3.2.4). Erst mit diesem ganzheitlichen Ansatz unter Beachtung des Wechselspiels der naturräumlichen, ökonomischen und gesellschaftlichen Voraussetzungen ist eine einvernehmliche nachhaltige Realisierung von Bioenergieprojekten vor Ort möglich.

Im Folgenden werden die verschiedenen Nachhaltigkeitsprinzipien am Beispiel Bioenergie erläutert. Diese Erläuterungen stammen teilweise aus dem Positionspapier „Nachhaltige Bioenergieentwicklung" des Interdisziplinären Zentrums für Nachhaltige Entwicklung (IZNE 2012), welches innerhalb des Projektes „Bioenergie im Spannungsfeld" erstellt wurde (übereinstimmende Passagen in kursiv; teilweise ergänzt und abgewandelt).

1.3.2.1 Achtungsprinzip

Das Achtungsprinzip beinhaltet die Achtung der Würde des Lebens und Bewahrung der Integrität aller Lebewesen und Erhaltung der Erde in ihrer Vielfalt. Alles, was existiert, ist voneinander abhängig; alles, was lebt, hat einen Wert in sich, unabhängig von seinem Nutzwert für die Menschen (nach Artikel 1 der Erd-Charta-Bewegung; Earth Charter International Secretariat 2000). Dieses übergeordnete Prinzip ist Leitgedanke der Nachhaltigkeit und betrifft die Mensch-Mensch-Beziehung, aber auch die Mensch-Tier- und die Mensch-Pflanze-Beziehung[4].

Die Produktion von Energiepflanzen (wie auch die sonstige landwirtschaftliche Produktion) sollte im Einklang mit dem Schutz der Natur (Erhalt der floristischen und faunistischen Diversität und der Qualität von Boden, Wasser, Luft) geschehen, damit das zukünftige Leben in seiner Vielfalt erhalten und die Lebensgrundlagen jetziger und zukünftiger Generationen gesichert bleiben. Tierhaltung und Pflanzenanbau sollten nach Kriterien einer naturverträglichen Landwirtschaft erfolgen. Die landwirtschaftliche Tierhaltung muss daher angepasst an die artspezifischen und natürlichen (angeborenen) Bedürfnisse und Verhaltensweisen der Tiere erfolgen (z.B. WBA 2015; Deutscher Tierschutzbund 2016). Industriell betriebene Intensivtierhaltung ist demzufolge abzulehnen. In einigen Regionen Niedersachsens („Veredlungs"regionen) ist es zu einer Doppelkonzentration von Bioenergiegewinnung und Viehhaltung gekommen. Diese „Vered-

[4] Hierbei spielt der Begriff der Achtsamkeit als eine der entscheidenden psychischen Beweggründe für eine nachhaltige Entwicklung eine große Rolle (siehe Hunecke 2013, S. 52).

lungs"regionen zeichnen sich durch Betriebe mit geringer landwirtschaftlicher Nutzfläche (Mittel: 45 ha), hohem Viehbestand (2,3 GVE/ha LF) und hohem Maisanteil auf der Ackerfläche (50% für Futter- und Energiemais) aus. Obwohl ein Bioenergieausbau auf solche industriellen landwirtschaftlichen Prozesse nur geringen Einfluss hat, sollten die Förderinstrumente so entwickelt werden, dass eine Vergütung nur für Wirtschaftsdünger erhalten werden kann, bei dem Tierschutz- und Hygieneaspekte (z. B. entsprechend eines „Tierwohllabels"; Deimel et al. 2010) beachtet wurden. Die unter diesen Bedingungen finanziell förderbare Gülleverstromung kann damit ein Antriebsmotor für eine nachhaltig orientierte Landwirtschaft werden.

Pflanzenneuzüchtungen sollten nicht zum Verschwinden alter Kulturpflanzensorten führen und die pflanzliche Diversität in der Landschaft nicht einschränken. Der Schutz von Boden, Luft und Wasser vor lebensschädigenden Einflüssen hat oberste Priorität.

1.3.2.2 Vorsorgeprinzip

Nach dem Vorsorgeprinzip sollten nach heutigem Wissen irreversible Eingriffe in die Ökosphäre unterlassen werden, um auch für die Zukunft alle Nutzungsoptionen offen zu halten. Bestehen wissenschaftliche und gesellschaftliche Bedenken oder Unsicherheiten hinsichtlich der Folgen, sollten diese Eingriffe unterbunden werden. Das Vorsorgeprinzip wird im Artikel 191 des EU-Vertrages über die Arbeitsweise der Europäischen Union erwähnt, wenn auch nicht klar definiert. Dabei soll das Vorsorgeprinzip der Risiko- bzw. Gefahrenvorsorge, besonders für Natur, Mensch, Tier und Pflanze dienen. Im Kapitel 35 der Agenda 21 wird das Vorsorgeprinzip so konkretisiert: „Angesichts der Gefahr irreversibler Umweltschäden soll ein Mangel an vollständiger wissenschaftlicher Gewissheit nicht als Entschuldigung dafür dienen, Maßnahmen hinauszuzögern, die in sich selbst gerechtfertigt sind. Bei Maßnahmen, die sich auf komplexe Systeme beziehen, die noch nicht voll verstanden worden sind und bei denen die Folgewirkungen von Störungen noch nicht vorausgesagt werden können, könnte der Vorsorgeansatz als Ausgangsbasis dienen" (UN 1992).

Nach diesem Prinzip sollte etwa vor Einführung nicht-heimischer Arten in Mitteleuropa (z. B. Igniscum = Energiepflanzensorte des Riesenknöterichs) als potenzielle Energiepflanzen deren Invasivität bzw. Verdrängungseffekt auf einheimische Pflanzenarten überprüft werden (LWK Niedersachsen 2013, S. 55). Vor dem Anbau von Energiepflanzen auf kontaminierten Böden ist sicherzustellen, dass keine kontaminierten Gärreste auf unbelastete Böden gelangen. Gentechnisch veränderte Pflanzen sind nach diesem Prinzip abzulehnen, da die Langzeitfolgen des Anbaus und der Nutzung von Genpflanzen nicht prognostiziert werden können (kritische Diskussion bei Leitungsgruppe des Nationalen Forschungsprogramm NFP 59 Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen 2012, Hrsg.). Daher sollten solche Pflanzen auch nicht angebaut werden, bis deren Unschädlichkeit für Ökologie, Umwelt und Gesundheit sichergestellt ist. Auch Kreisläufe, in die gentechnisch veränderte Pflanzen eingehen (Gensoja-Rind-Gülle-Biogas), sind abzulehnen. Neuzüchtungen von Kulturarten sollten vor ihrer Einführung auf ihre Auswirkungen auf die Biodiversität überprüft werden, wobei der Erhalt alter Sorten sicherzustellen ist.

Kulturen und Anbaukonzepte, die langfristig die Bodenqualität verschlechtern, wie z. B. Mais in Monokultur, sollten flächenanteilig verringert werden (siehe Konsistenzprinzip).

1.3.2.3 Konsistenzprinzip

Unter dem Konsistenzprinzip versteht man, dass durch die Sicherung der menschlichen Versorgung mit Energie, Rohstoffen, Wasser und Nahrungsmitteln der Zustand der Kultur- und Naturlandschaft sich nicht verschlechtern darf, sondern im Gegenteil im Hinblick auf die Chancen zukünftiger Generationen auf eine Verbesserung hingewirkt werden sollte. Dabei sollten die Stoffflüsse ausgeglichen sein, zusätzliche Schad- und Nährstoffeinträge in Umwelt und Ökosysteme weitgehend vermieden sowie Klima und Arten nicht negativ beeinflusst werden. Das Konsistenzprinzip wirkt damit vor allem auf die Bereiche Klima, Bodenfruchtbarkeit, Wasser und Biodiversität.

Beispiel Klima

Um die Treibhausgasbilanzen in der Landwirtschaft und speziell beim Anbau von Energiepflanzen zu verbessern, muss der weitere Umbruch von Grünland generell verboten werden. Ein Umbruch insbesondere von organischen und hydromorphen Böden zugunsten von Nahrungs-, Futter- oder Energiepflanzen führt zu einer massiven Verschlechterung der Klimabilanz. Ein Anbau von Energiepflanzen wird auf diesen Standorten bezüglich des Klimaschutzes ad absurdum geführt (Jordan 2012, S. 126; siehe auch Kap. 2.1.3, 3.5; UBA 2013, S. 9ff). Der Umbruch des Grünlandes sollte mit einem Ausfall der Subventionszahlungen geahndet werden. Wegen hoher Treibhausfreisetzungen aus Vegetation und Böden gilt dies auch für die Abholzung von Wäldern.

Weite Energiepflanzen-, Gülle- und Gärresttransporte über Regions- oder Ländergrenzen (z. B. Gülle- und Gärrestimporte aus den Niederlanden und aus den sog. Veredlungsregionen) hinweg sollten aus Klimaschutzgründen ebenfalls vermieden werden. Folgerichtig ist eine Extensivierung der dortigen Tierhaltung anzustreben, bei der lokal bis regional ausgeglichene Nährelementströme ohne Überschüsse gewährleistet sind. Dies erspart Transportwege, vermindert die Emissionen von Klimagasen und verbessert die dortige Oberflächen- und Grundwasserqualität durch Minimierung von Nährstoffeinträgen (s. Wasser).

Gülle aus der Viehhaltung sollte als landwirtschaftlicher Reststoff möglichst vollständig in Biogasanlagen vergoren werden, um die restlichen Energieinhalte auszunutzen und Treibhausgasemissionen zu minimieren. Dies trifft auch für die Vergärung von Energiepflanzen zu: Nur eine ausreichende Verweilzeit in den Fermentern sorgt für einen hohen Abbaugrad der Biomasse und nur noch marginalen Anteilen von leicht vergärbarem Kohlenstoff im Gärrestlager, so dass die Methanemissionen nicht nur weitestgehend vermieden, sondern auch genutzt werden. Die homogenisierten Gärreste (aus Gülle und pflanzlichen Materialen) sollten in den Boden bedarfsgerecht injiziert oder per Schleppschuhtechnik eingebracht werden. Hierdurch können Ammoniak- und Lachgasemissionen minimiert werden. Biogasanlagen sollten bestmöglich gegen Methanverluste (durch luftdichte Überdachung der Gärrestlager, Verminderung von Methanschlupf) geschützt werden.

Palm- oder Jatrophaölanbau darf nicht auf gerodeten Waldflächen und auch nicht auf den bisherigen für Nahrungsmittelgewinnung genutzten Flächen erfolgen. Es darf nicht zu einem indirekten Landnutzungswandel kommen, indem Energiepflanzen Nahrungsmittel auf den bereits genutzten Flächen verdrängen und für Nahrungsmittel neue Waldflächen abgeholzt werden. In beiden Fällen ist die Klimabilanz negativ.

Beispiel Wasser

Die Gefahr des Nitrat-Eintrages ins Grundwasser besteht bei der Gärrest- wie auch bei der Gülleausbringung und sollte durch eine Extensivierung der Tierhaltung und einen bedarfsgerechten Einsatz der Gärreste als Dünger minimiert werden. Hierzu gehört unter anderem eine Nährstoffbilanzierung. Eine Nährstoffbilanzierung sollte generell über die Fruchtfolge erfolgen und die Düngung sich an den Nährstoffentzügen der Pflanzenarten orientieren. Die Ermittlung der N_{min}*-Gehalte (mineralische Stickstoffgehalte) im Frühjahr vor der Düngung ist obligatorisch für eine bedarfsgerechte Stickstoffdüngung. Regelmäßige Untersuchungen der Gärreste auf Nährstoffgehalte sind daher notwendig, um die Düngung in Menge und Zeit dem Wachstum der Pflanzen anzupassen. Hierauf ausgerichtete, gezielte Düngungsmaßnahmen verlangen eine ausreichende Lagerkapazität für die Gärreste. Die vorzuhaltende Lagerkapazität sollte an das Anbaukonzept der Biogasbetriebe angepasst werden. Je vielfältiger das Anbaukonzept mit winter- und sommerannuellen Hauptkulturen, Zwischenfrüchten sowie Erst- und Zweitkulturen angelegt ist, desto länger erstreckt sich der Zeitraum, in dem der Gärrest zum optimalen Zeitpunkt ausgebracht werden kann, und desto geringere Lagerraumkapazitäten müssen vorgehalten werden.*

Mit den Gärresten werden alle von den Pflanzen dem Boden entzogenen Elemente wieder auf die Felder zurückgegeben, womit die Nährstoffkreisläufe nahezu geschlossen werden. Mit bedarfsorientierter Rückführung der Gärsubstrate kann die Gewässereutrophierung durch Phosphor und Stickstoff verhindert werden. Die Rückführung schont die Umwelt, spart Kosten ein und trägt zur Humusreproduktion bei. Die Phosphatrückführung ist wegen der Begrentheit der Phosphatreserven in den weltweiten Lagerstätten von besonderer Relevanz (s. Kap. 1.1).

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM) und damit der Eintrag von PSM in das Grundwasser sollte minimiert werden.

Beispiel Boden

Zur Erhaltung der Bodenstrukturen und zur Verringerung von Wind- und Wassererosion sowie der Eutrophierung der Gewässer durch Nährstoffeinträge ist es notwendig, eine ganzjährige Bodenbedeckung einzuhalten.

Mehrgliedrige Fruchtfolgen, die zu einer ausgeglichenen Humusbilanz führen (Abstimmung von humusmehrenden und humuszehrenden Kulturen), fördern einen ausgeglichenen Humushaushalt des Bodens für optimale Produktionsbedingungen (siehe Kap. 3.3.3; UBA 2013 S. 14).

Auf mit Schadelementen kontaminierten Standorten sollten keine Nahrungs- und Futtermittelpflanzen, sondern Energiepflanzen angebaut werden (siehe Kap. 3.10).

Beispiel Biodiversität

Bei der Energiepflanzengewinnung für Biogas sollte weitgehend auf PSM verzichtet werden. Grundsätze des integrierten Pflanzenschutzes (z. B. Vorrang biologischer und mechanischer Maßnahmen, resistente Sorten, Energiepflanzen-Mix) sollten konsequent angewendet werden. Ein geringerer Einsatz von Herbiziden führt zur Erhöhung der Artenvielfalt von Wildgräsern und -kräutern, was sich positiv auf die Biodiversität der Fauna der Äcker auswirkt. Mehrjährige Kulturen (durchwachsene Silphie, Dauergräser, Wildpflanzenmischungen für Biogas) können die Gefahr einer Verunkrautung verringern und somit die Anwendung mit PSM ebenfalls erheblich reduzieren (siehe Kap. 3.3.3).

Biodiversität sollte auf Ackerland generell gefördert werden. Großflächige Monokulturen, ob Mais oder andere Kulturen, sind zu vermeiden. Mehrgliedrige Fruchtfolgen mit einer räumlich heterogenen Verteilung unterschiedlicher Kulturen bieten eine deutlich höhere räumliche und zeitliche Variabilität an Lebensräumen, die mit einer insgesamt höheren Biodiversität in der Agrarlandschaft einhergeht. Alternative Energiepflanzen mit hohem Energieertrag (durchwachsene Silphie, Triticale, Sonnenblumen u.a.) können dazu beitragen, die Kulturartenvielfalt auf den Äckern wiederherzustellen. Mischkulturen, wie z. B. Wintertriticale plus Winterwicke oder ein Gemenge aus Wintertriticale, -roggen, -hafer und -weizen tragen ebenfalls zur Kulturartenvielfalt und Ertragsstabilisierung bei. Wildkräuter zur Biogasnutzung, Untersaaten und Zweikultur-Anbau können das gesamte Spektrum abrunden (siehe Kap. 3.3.3).

Ein weiteres schon viel angewendetes Beispiel zur Erhöhung der Biodiversität ist das Anlegen von Blühstreifen am Rande von Feldern. Dabei sollten keine potenziell florenverfälschenden Arten und Sorten verwendet und auf Düngung und Pflanzenschutzmittel konsequent verzichtet werden. Die Artenzusammensetzung und Struktur der Blühstreifen sollte neben dem Bodenschutz auf die Verbesserung des Lebensraumangebotes für Arten der Agrarlandschaft ausgerichtet sein. Hierzu sollten die Streifen eine Breite von mindestens 3 m (besser 6 m) aufweisen und mindestens zwei Jahre nicht gemäht oder umgebrochen werden (siehe Kap. 2.1.3, 3.3, 3.5.6.2).

Auch schnellwachsende Baumarten können die Landschaft vielfältiger machen, indem sie der Landschaft Struktur verleihen und neue Lebensräume bieten. Ökologische Ausgleichsflächen, sinnvoll vernetzt mit z. B. Saumstrukturen, Blühstreifen, Feldgehölzen oder Extensivgrünland, tragen ebenfalls erheblich zur Erhöhung der Biodiversität bei. Sie sollten daher in ihrem Bestand geschützt und insbesondere in ausgeräumten Agrarlandschaften und bei großen Schlägen neu angelegt und entwickelt werden.

Die Erntezeitpunkte von Energiepflanzen sollten Artenschutzziele berücksichtigen. Insbesondere auf den Schutz von Bodenbrütern und Niederwild sollte geachtet werden.

1.3.2.4 Partizipationsprinzip

Das Partizipationsprinzip beinhaltet die Teilhabe von allen Interessensgruppen (Landwirte, Techniker, Politiker, NGOs, Verwaltungen und der Bevölkerung) an Entscheidungen zur Lösung der anstehenden Fragen unserer zukünftigen gesellschaftlichen Weiterentwicklung. Dabei kann zwischen zwei Gruppen: a) direktdemokratische bzw. plebiszitäre Verfahren (Bürgerbegehren und Volksentscheide) und b) „dialogorientierte, deliberative Verfahren“ (Nanz & Fritsche 2012) unterschieden werden. *Auch „nicht genehme“ Gruppen mit kritischen Meinungen sollten einbezogen werden, da hierdurch unterschiedliche Blickwinkel sichtbar werden. Dabei werden Interessenskonflikte durch partnerschaftliche Lösungen reflektiert und geklärt. Ausgereiftere, breiter akzeptierte Lösungen entstehen. Der Einfluss aller Beteiligten an den Entscheidungsprozessen soll damit gesichert werden und ein Gegeneinander von einem Miteinander abgelöst werden.* Ein Recht auf Partizipation beinhaltet eine offene Kommunikation über Konflikte und Probleme, eine transparente Informationspolitik und eine möglichst gleichberechtigte Entscheidungsgewalt bei allen Beteiligten. Damit verbunden ist die Verantwortung, sich an den Entscheidungsprozessen zu beteiligen und einen aktiven Beitrag an einer konsensorientierten Entschei-

dungsfindung zu leisten. Nanz & Fritsche (2012, S. 10) erläutern die Bedeutung der Bürgerbeteiligung folgendermaßen: „*Neben einer Modernisierung administrativer Strukturen und der Verbesserung öffentlicher Leistungen hat Bürgerbeteiligung auch eine Wiederbelebung lokaler oder regionaler Gemeinschaften sowie eine Stärkung demokratischer Prinzipien zum Ziel*".

Bei Energieprojekten, insbesondere Bioenergieprojekten, sollte durch die Vielzahl möglicher Interessenskonflikten von Anfang an die Beteiligung unterschiedlicher Interessensgruppen gesucht werden. Es hat sich gezeigt, dass hierdurch die Akzeptanz von Energieprojekten gesteigert und langfristig gesichert werden kann (Wüste 2013). Gemeinschaftlich organisierte Bioenergieprojekte wie Bioenergiedörfer erhöhen nicht nur die lokale und regionale Akzeptanz beim Umbau des Energiesystems, sondern bringen die Energiefrage wieder zurück zu den Nutzern von Energie, zurück in die Gesellschaft. Dezentrale Lösungen können dieses Partizipationsrecht eher sicherstellen als zentrale Großprojekte mit verschiedenen Großinvestoren. Bei dezentralen Projekten können die Menschen auch flexibler auf verschiedene Nutzungs- und Interessenskonflikte reagieren, vorausgesetzt, die Partizipationsbereitschaft bei den Akteuren ist gegeben. Es hat sich gezeigt, dass partizipative, dezentrale Energievorhaben auch positive psychologische Auswirkungen bei den beteiligten Individuen oder Gruppen haben können. Wenn Menschen sich einbringen können und - evtl. auch in der Gruppe - die Erfahrung machen, dass ihre Bemühungen erfolgreich sind, entwickeln sie Stolz auf ihre Arbeit oder auch eine erhöhte Selbstwirksamkeitserwartung. Damit einhergehen Überzeugungen wie: „Wir haben das (gemeinsam) geschafft!" oder „Wir sind nicht abhängig von denen da oben!", wie die Reaktionen im Bioenergiedorf Jühnde zeigten (Ruppert et al. 2008; Eigner-Thiel & Schmuck 2010). Für zukünftige Projekte bedeutet das wiederum, dass diese viel leichter angegangen werden, weil positive Erfahrungen bereits existieren und diese sich positiv auf die weitere Motivation auswirken.

Bioenergieprojekte sollten von Beginn an in eine übergeordnete regionale Planung für erneuerbare Energieträger eingebettet werden, wobei die derzeitigen ökonomischen Randbedingungen zu berücksichtigen sind. Diese Randbedingungen müssen so gestaltet werden, dass die energetische Wende von der Bevölkerung nicht nur akzeptiert, sondern auch mitgestaltet wird.

1.3.2.5 Effizienzprinzip

Der Begriff Effizienz wird unterschiedlich definiert und verwendet. So wird unterschieden z. B. zwischen einer technischen Effizienz, die in Einheiten wie „kWh Nutzenergie pro Einsatz von kWh Primärenergie" beschrieben wird, und der ökonomischen Effizienz mit Einheiten wie „€ pro kWh Strom". Auch in anderen Bereichen wird der Begriff Effizienz verwendet – so z. B. „ökologische Effizienz" oder „soziale Effizienz". Die Idee der Effizienz besteht in der Vermeidung von Ressourcenverschwendung. Dem Beitrag hier liegt der Begriff der Energieeffizienz zu Grunde. Das Umweltbundesamt definiert Energieeffizienz als das Verhältnis von erzieltem Nutzen und eingesetzter Energie (UBA 2012). Dabei ist die Energieeffizienz, neben der Suffizienz und Konsistenz, ein Teilbereich, um Energie (z. B. in Form von elektrischer, thermischer oder mechanischer Energie) einzusparen. Um eine nachhaltige Energieversorgung für die nächsten Generationen zu sichern ist das Zusammenspiel dieser drei Teilbereiche notwendig.

Der Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung von der Pflanze hin zu elektrischer und/oder thermischer Energie sollte möglichst hoch sein, damit der Verbrauch von Ressourcen minimiert werden kann. Eine Möglichkeit der effizienten Energiebereitstellung ist die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), bei der elektrische und thermische Energie erzeugt werden. Ein hoher Wirkungsgrad von 80-90% setzt eine sinnvolle Wärmenutzung z. B. in lokalen und regionalen Nahwärmenetzen für anliegende Wohn- und Wirtschaftsgebäude voraus. Um die entstandene Wärme zu nutzen, sind neue Wärmekonzepte z. B. in Verbindung mit Satelliten-Blockheizkraftwerken denkbar. Der Ort der Energieerzeugung sollte sich dabei an dem Ort der Wärmenutzung orientieren (Jordan 2012, S. 112, WBGU 2008, S. 198 ff.). Gleichzeitig sollte sich die Dimensionierung der Biogasanlage mehr am Wärmebedarf denn an der maximal möglichen Stromproduktion orientieren. Entsprechend der Maßgabe der Regelbarkeit der Biogasanlagen, kann der verminderte Wärmebedarf im Sommer durch eine Verringerung der Leistung der Biogasanlagen während dieser Zeit erreicht werden. Die gesparten Substrate können dann in den Wintermonaten zusätzlich verbraucht werden (UBA 2013). Modelle zur flexiblen Gestaltung der Nahwärmenetze und zur Dimensionierung der Anlagen sind in den Kapiteln 3.2 und 3.9 zu finden.

Neben der KWK-Nutzung ist es für einen effizienten Einsatz von Biomasse notwendig, die Kaskadennutzung (= Nutzung über mehrere Verwertungsstufen) zu intensivieren[5], um den Flächenbedarf für die energetische aber auch für die stoffliche Nutzung zu verringern. H ist eine deutliche Priorisierung der Biomasse für Nahrungs- und Futtermittel vorzusehen (UBA 2013, S. 20). Reststoffe aus der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sollten zunächst möglichst der stofflichen und dann der energetischen Nutzung zugeführt werden.

Im Zusammenspiel mit den anderen fluktuierenden Erneuerbaren Energien (EE) kann die Bioenergie sehr gut als Regelenergie auf dem Stromsektor fungieren: Da die Bioenergie die einzige direkt speicherfähige Energiequelle im Bereich der EE ist, können damit die Schwankungen anderer Energiequellen durch witterungsbedingte und jahreszeitliche Einflüsse durch eine bedarfsorientierte Einspeisung ins Stromnetz bzw. Beschickung von Heizungsanlagen ausgeglichen werden. Bei starkem Wind, viel Sonne und geringem Verbrauch ließe sich das überschüssige Biogas lokal speichern. Im Fall einer erhöhten Nachfrage kann es dann bedarfsgerecht verstromt werden. Die Energieeffizienz der Gesamtstromproduktion würde damit entscheidend erhöht. Trommler et al. (2016) sprechen von flexiblen Biogasanlagen und geben einen aktuellen Überblick zu technischen Ansätzen, den rechtlichen Rahmen und ihrer Bedeutung für das Energiesystem. Bis Mitte 2015 hatten sich bereits 3000 der 8000 Betreiber von Biogasanlagen für eine entsprechende Flexibilitätsprämie im Rahmen des EEG angemeldet (Trommler et al. 2016).

---

[5] Kaskadennutzung definiert das Umweltbundesamt folgendermaßen: *„Eine Strategie, Rohstoffe oder daraus hergestellte Produkte in zeitlich aufeinander folgenden Schritten solange, so häufig und so effizient wie möglich stofflich zu nutzen und erst am Ende des Produktlebenszyklus energetisch zu verwerten. Dabei werden sogenannte Nutzungskaskaden durchlaufen, die von höheren Wertschöpfungsniveaus in tiefere Niveaus fließen. Hierdurch wird die Rohstoffproduktivität gesteigert."* (UBA 2012, S. 10)

Hochgereinigtes Biogas (Biomethan) hat als Kraftstoff auf den Hektar bezogen eine wesentlich bessere Energieausbeute als andere Biokraftstoffe wie Biodiesel und Bioethanol (FNR 2016a). Es sollte sich dementsprechend eine Fokussierung hin zu der Energienutzungsform ergeben, die den höchsten Energieoutput hat und mit der eine höchstmögliche Regelbarkeit zu erzielen ist (WBGU 2008, S. 204 ff.). Anbetracht der steigenden Elektromobilität sollte jedoch klar gesehen werden, dass für die Mobilität PV-Strom vom Dach flächenmäßig um bis zu 30-fach effizienter zu erzeugen ist als Strom aus Biomasse. Die Umwandlung von Strom aus Wind- und PV-Anlagen im *power-to-gas*-Verfahren in Methan oder Wasserstoff und deren Speicherung im Erdgasnetz ist zwar technisch möglich; die Rückverstromung ist jedoch sehr ineffizient und teuer (Zapf 2017). Die Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz muss ebenfalls vor diesem ökonomischen Hintergrund diskutiert werden.

Generell bietet eine Zwischenspeicherung von Methan und Wasserstoff im Erdgasnetz die Option, bedarfsorientiert Strom in Gaskraftwerken zu erzeugen oder Methan als Kraftstoff oder zur Herstellung chemischer Grundstoffe zu benutzen. Bezogen auf Strom und Wärme bietet die Einspeißung ins Gasnetz einen hohen Grad an zeitlicher und räumlicher Flexibilität bei gleichzeitiger guter Absicherung der benötigten Leistung. Bei all den genannten Verfahren muss bedacht werden, dass zur Herstellung der einspeisbaren Gase wie auch der Wiedergewinnung der elektrischen oder thermischen Leistung wiederum Energie verbraucht wird und somit die Effizienz abnimmt. Die Kraft-Wärme-Kopplung vor Ort (z. B. im Gebäudebestand) ist wiederum eine Möglichkeit, Effizienzverluste zu minimieren (Jordan 2012, S. 111ff).

Die hier nur angedeuteten Möglichkeiten machen klar, dass das fossile zentralistisch organisierte Energiesystem umgewandelt wird in ein dezentrales flexibles System basierend auf sich selbst erneuernden Quellen.

Die anderen Nachhaltigkeitsprinzipien (z. B. Konsistenz-, Achtungs- und Vorsichtsprinzip) dürfen bei der Suche nach Effizienzverbesserungen nicht missachtet werden. So ist z. B. der monokulturelle Anbau (fehlende Fruchtfolgen) von Mais trotz der hohen Energieausbeute nicht generell zu fördern, da negative ökologische Auswirkungen auf Boden, Grundwasser und Landschaftsbild festzustellen sind.

1.3.2.6 Gerechtigkeits- und Suffizienzprinzip

Mit diesem Prinzip sind die gerechte Verteilung von Gütern und Ressourcen beschrieben sowie eine gerechte Wertschöpfungskette bei der Produktion von Stoffen. Verbunden damit ist die Bemühung um eine Produktionsweise und einen Lebensstil mit möglichst sich erneuernden Rohstoff- und Energieformen bei einem maßvollen Verbrauch.

Dezentrale Energieversorgung

Mit dezentralen Energiekonzepten wie Bioenergiedörfern zielt man darauf ab, die Wertschöpfung in der Region zu halten und die Bevölkerung hieran zu beteiligen. Die Bioenergieerzeugung sollte weiterhin in der Hand der landwirtschaftlichen Betriebe oder innerhalb der Kommunen verbleiben und damit der lokalen Landwirtschaft ein weiteres Standbein geben. Dementsprechend sollten die Förderinstrumente, besonders das EEG, eher die kleineren bis mittleren Anlagen bis 1 MW elektrischer Leistung fördern. Damit bleiben Arbeitsplätze im ländlichen Raum erhalten und dem allgemeinen Abwanderungstrend in die Städte wird entgegengewirkt. Kleine bis mittlere dezentrale Anlagen sollten das Herzstück der Energiewende sein.

Die Landwirtschaft sollte dabei aber nicht nur Lieferant von Substraten sein, sondern möglichst an der gesamten Wertschöpfungskette teilnehmen. Partnerschaften mit den Kommunen oder regionalen Energieversorgungsunternehmen sind auszuloten. Vorteile insgesamt sind konsensfähige, lokal optimierte Konzepte mit hoher Akzeptanz, Arbeitsplatzstabilisierung in der Region, lokale Gewerbesteuereinahmen etc.

In diesem Zusammenhang muss über die globale ökologische Gerechtigkeit und das Gleichheitsrecht auf faire Teilhabe an Naturgütern gesprochen werden. Betrachtet man die landwirtschaftliche Produktionsfläche pro Kopf, die derzeit benötigt wird, um Deutschland zu ernähren, stellt man schnell fest, dass die inländische Anbaufläche zur Selbstversorgung nicht ausreicht (s. Kap. 1.1.4).

Dementsprechend ist eine Veränderung des Lebensstiles, insbesondere des Fleischkonsums, eine aus Gerechtigkeitsaspekten notwendige Handlungsanleitung, da der westliche Lebensstil die örtliche Teilhabe an Naturgütern in Schwellen- und Entwicklungsländern verringert. Zugespitzt könnte man sagen, dass der hohe Futtermittelbedarf westlicher Kulturen die nachhaltige Entwicklung der Schwellen- und Entwicklungsländer behindert. Die mit dem Anbau verbundenen Landnutzungsänderungen (direkt und indirekt) und die daraus resultierenden globalen Klimaauswirkungen treffen wiederum die gleichen Länder besonders hart (IPCC 2013, IPCC 2008, S. 48f). Betrachtet man gleichzeitig die Möglichkeiten, die eine lokale Nutzung von Bioenergie in den sich entwickelnden Ländern mit sich brächte, wird noch deutlicher sichtbar, welche Bremse der westliche Lebensstil vor Ort sein kann. *Dabei kann in diesen Ländern entgegengesetzt zur Diskussion Teller-Tank der Anbau von Energiepflanzen eventuell zu neuen lokalen Einkommensperspektiven führen, da Bioenergie eine kostengünstige dezentrale Versorgung mit Strom und Wärme/Kühlung sicherstellen kann, welche für viele lokale gesellschaftliche und ökonomische Aktivitäten Antrieb sein kann. Auch hier sollte die Nahrungsmittelproduktion immer Vorrang haben. Durch Aussicht auf lokale Einkommen kann eventuell der Exodus aus den ländlichen Arealen in die Städte gestoppt oder sogar eine Rückkehr aufs Land gefördert werden. Diese Aspekte sind länderspezifisch und damit jeweils lokal zu beurteilen. Doch Vorsicht ist auch in diesem Bereich geboten. Die lokale kleinbäuerliche Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln und möglicherweise Energiepflanzen in den Entwicklungs- und Schwellenländern darf nicht durch den großflächigen*

Ankauf von Ackerland durch ausländische Investoren (land grabbing) - z. B. für den großflächigen Anbau von Energiepflanzen - eingeschränkt werden[6].

Veränderung des Konsumverhaltens

Um den Bedarf an Energie zu senken, bedarf es neben Effizienz- und Konsistenzmaßnahmen aber auch der Veränderung des persönlichen Lebensstiles bezüglich des eigenen Energieverbrauches. Gemeint ist damit nicht nur die Anschaffung technisch effizienterer Geräte und Anlagen, sondern vielmehr eine Neuausrichtung u. a. des individuellen Konsumverhaltens (z. B. Fleischverbrauch, Langlebigkeit von Verbrauchsgütern), der Mobilität (gefahrene Kilometer mit dem PKW, ÖPNV und Fahrrad) und der Wohnverhältnisse (Wohnungsgröße; Trennung Wohn- und Arbeitsort; Wärmeisolierung; Heizen mit Holz/Pellets; Lüftungsverhalten; eigene PV-Anlage auf dem Dach etc.). Auf dieser Basis kann der Energiebedarf langfristig gesenkt, die Anbaufläche für Energiepflanzen reduziert und der Nutzungskonflikt Nahrungs- und Futtermittel versus Energiepflanzen entschärft werden. Findet diese Kopplung zwischen persönlichen Lebensstil und Energieverbrauch nicht statt, werden die Energieeinsparungen, die durch verbesserte Effizienzmaßnahmen erreicht wurden, durch vermehrten Konsum von Energie eventuell aufgezehrt (Rebound-Effekt).

Vielfach wird Suffizienz auch mit Verzicht gleichgesetzt. Jordan (2012, S. 139) spricht davon, „[…] dass eine nachhaltige Bioenergienutzung ohne das Motiv des Verzichts und der Selbstbeschränkung nicht zu haben sein wird. […]. Das Prinzip der Suffizienz erfordert den Verzicht auf maximale Erträge, wenn diese mit destruktiven Praktiken erkauft werden." Gerade deshalb ist es so schwer, Suffizienzstrategien in der Gesellschaft zu verankern. Politiker wagen sich unter dem Deckmantel der „Entscheidungsfreiheit eines jeden Mitbürgers" an das Thema nicht heran, obwohl klar ist, dass ohne eine politische Steuerung und organisatorische Strukturen eine individuelle Verhaltensänderung schwer möglich sein wird (Hunecke 2013, S. 86). Dabei bedeutet Verzicht nicht Verringerung der Lebensqualität oder des individuellen Wohlbefindens. Vielmehr ist hier der Verzicht auf materiellen „Ballast" gemeint. Damit verbunden ist ein Lebensstil des „intensiven positiven Erlebens des Alltags" (Hunecke 2013, S. 45[7]) und somit einer Verbesserung der Lebensqualität jenseits materieller Bedürfnisbefriedigung.

Eigner-Thiel (2005) konnte einige der von Hunecke (2013) beschriebenen notwendigen psychologischen Ressourcen zu einem nachhaltigen Lebensstil bei der Umsetzung des Bioenergiedorfes Jühnde beobachten. Es wurde deutlich, dass sich gerade bei dezentralen Energieprojekten mit einem hohen Partizipationsanspruch der persönliche Lebensstil der Mitwirkenden hin zu einem nachhaltigeren Lebensmuster stärker entwickeln kann als bei Nichtbeteiligten. Starken Einfluss darauf hatte vor allen Dingen der Faktor Selbstwirksamkeit.

---

[6] Zum Thema „land grabbing" siehe Jordan (2012, S. 137f)

[7] Hunecke (2013) beschreibt folgende 6 psychologischen Ressourcen um einen nachhaltigen Lebensstil individuell umzusetzen: Genussfähigkeit, Achtsamkeit, Selbstakzeptanz, Selbstwirksamkeit, Sinnkonstruktion und Solidarität

Diese eben beschriebenen Nachhaltigkeitsprinzipien werden im weiteren Verlauf des Buches, soweit möglich, in Form von Nachhaltigkeitskriterien heruntergebrochen. Verschiedene Analyseverfahren werden dabei genutzt, um den Kriterien eine solide Datengrundlage und damit eine Vergleichbarkeit zu geben. Quantitative sowie qualitative Daten werden zur Bewertung herangezogen. Aber, wie oben schon erwähnt, können nicht alle Aspekte des Prinzipienmodells in Kriterien übersetzt werden. Es fehlt oftmals an aussagekräftigen Daten, die einen Vergleich von Biomassekonzepten erst möglich machen. Nichtsdestotrotz ist es notwendig, diese Aspekte (z. B. ethische und moralische Aspekte) bei der Entscheidungsfindung mit zu berücksichtigen und in den Abwägungsprozess systematisch zu integrieren.

Literatur

Binswanger, H.-C., Ekardt, F., Grothe, A., Hasenclever, W.-D., Hauchler, I., Jänicke, M., Kollmann, K., Michaelis, N.V., Nutzinger, H.G., Rogall, H. & Scherhorn, G. (Hrsg., 2013). *Jahrbuch der Nachhaltigen Ökonomie 2013/2014*. Im Brennpunkt: Nachhaltigkeitsmanagement. 519 S., Metropolis Verlag Marburg; ISBN 978-3-7316-1043-4.

Braungart, M. &; McDonough, W. (2008). *Einfach intelligent produzieren. cradle to cradle: Die Natur zeigt, wie wir die Dinge besser machen können.* Berliner Taschenbuch Verlag, Berlin, 2008, ISBN 9-783-83330183-4

Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind: the Anthropocene. *Nature* 415, 23.

Deimel, I., Franz, A., Frentrup, M., von Meyer, M., Spiller, A. & Theuvsen, L. (2010). *Perspektiven für ein europäisches Tierschutzlabel.* Georg-August-Universität Göttingen. Gesichtet am 6.3.2016: https://www.uni-goettingen.de/en/abschlussbericht-des-animal-welfare-projekts/138817.html

Deutscher Tierschutzbund (2016). *Zeichen für ein besseres Leben - Informationen zum Tierschutzlabel.* 12 S. Gesichtet am 22.4.2016: http://www.tierschutzlabel.info/fileadmin/user_upload/Dokumente/Tierschutzlabel-Brosch%C3%BCre.pdf

Eigner-Thiel (2005). *Kollektives Engagement für die Nutzung erneuerbarer Energieträger. Motive, Mobilisierung und Auswirkungen am Beispiel des Aktionsforschungsprojektes „Das Bioenergiedorf“.* Verlag Dr. Kovac. Hamburg

Eigner-Thiel, S. & Schmuck, P. (2010). Gemeinschaftliches Engagement für das Bioenergiedorf Jühnde: Ergebnisse einer Längsschnittstudie zu psychologischen Auswirkungen auf die Dorfbevölkerung. *Umweltpsychologie* 14(2), 98-120

Hunecke, M. (2013). Psychologie der Nachhaltigkeit. Psychische Ressourcen für Postwachstumsgesellschaften. Oekom Verlag. 124 S., München. ISBN-13: 978-3-86581-452-4.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2008). *Fourth Assessment Report (AR4). Climate Change 2007 Synthesis*. Gesichtet am 4.12.2013:

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2013). *Working Group I Climate Change - The Physical Science Basis.* Gesichtet am 2.12.2013: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UpyUEuK0QXE

IZNE (Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung 2012). *Positionspapier Nachhaltige Bioenergieentwicklung.* 15 S. Göttingen. Gesichtet am 18.4.2016: http://www.izne.uni-goettingen.de/wp-content/uploads/2012/10/Positionspapier-Bioenergie-IZNE-2012.pdf

Jordan, A, (2012.) *Die große Transformation und ihre Feinde. Zur Geltung von Nachhaltigkeitsleitbildern am Beispiel Biogas.* 594 S., Metropolis. Marburg.

Kopatz, M. (2013). Die soziale-kulturelle Revolution. In: Huncke, W., Kerwer, J. & Röming, A. (Hsg.): *Wege in die Nachhaltigkeit - die Rolle von Medien, Politik und Wirtschaft bei der Gestaltung unserer Zukunft.* S. 161-197. Hessische Landeszentrale für politische Bildung. Wiesbaden. Gesichtet am 22.4.2016: http://www.forum-fuer-verantwortung.de/sites/default/files/pub_polis_wege_nachhaltigkeit.pdf

Leitungsgruppe des *Nationalen Forschungsprogramm* NFP 59 (Hrsg. 2012). *Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen - Programmsynthese des Nationalen Forschungsprogramms 59.* Bern, 304 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:6031/eth-6031-01.pdf

Lenton, T., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S. & Schellnhuber, H.J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(6), 1786–1793.

Loorbach, D. (2007). *Transition Management. New mode of Governance for sustainable development.* 327 S., International Books. Utrecht

LWK Niedersachsen (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2013). *Energiepflanzen für Biogasanlagen. Regionalbroschüre Niedersachsen.* FNR (Hrsg.), 2. Auflage, 84 S., Gülzow

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. & Behrens III, W.W. (1972). *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit.* Aus dem Amerikanischen von Hans-Dieter Heck. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1972.

Nanz, P. & Fritsche, M. (2012). Handbuch Bürgerbeteiligung. Verfahren und Akteure, Chancen und Grenzen. *Bundeszentrale für politische Bildung Schriftenreihe* Band 1200. Bonn. Gesichtet 4.12.2013 http://www.bpb.de/shop/buecher/schriftenreihe/76038/handbuch-buergerbeteiligung

Ott, K. & Döring R. (2009). *Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit.* Ökologie und Wirtschaftsforschung 54, 382 S. Metropolis Verlag. Marburg.

Ott, K. (2009). Leitfaden einer starken Nachhaltigkeit - Ein Vorschlag zur Einbindung des Drei-Säulen Modells. *GAIA* 18(1), 25-18. Oekom Verlag.

Paech, N. (2006). Nachhaltigkeitsprinzipien jenseits des Drei-Säulen-Paradigmas. *Natur und Kultur* 7(1), 42-62.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å, F. Chapin, S, Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472-475.

Ruppert, H., Eigner-Thiel, S., Girschner, W., Karpenstein-Machan, M., Roland, F. Ruwisch, V., Sauer, B. & Schmuck, P. (2008). *Wege zum Bioenergiedorf - Leitfaden für eine eigenständige Strom- und Wärmeversorgung auf Basis von Biomasse im ländlichen Raum.* 120 S., mit DVD, ISBN 978-3-9803927-3-0. Gesichtet am 30.4.2017: https://mediathek.fnr.de/downloadable/download/sample/sample_id/193/

Schidler, S. (2003). Integrative Nachhaltigkeitsabschätzung von Technologien im Bereich Nachwachsende Rohstoffe. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* Nr. 12(3/4). S. 32-37. Gesichtet am 22.4.2016: https://www.tatup-journal.de/weiterleitung2809.php

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen 2008). *Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels.* Umweltgutachten 2008. Berlin: Erich Schmidt

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen 2013). *Den Strommarkt der Zukunft gestalten. Sondergutachten.* 175 S. Gesichtet am 22.4.2016: www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2013_11_SG_Strommarkt_der_Zukunft_gestalten.pdf?__blob=publicationFile

Steffen, W., Crutzen, P.J. & McNeill, J.R. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of Nature? *Ambio* 36, 614–621.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B. & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347(6223), 13. Febr. 2015.

Trommler, M., Dotzauer, M., Barchmann, T., Lauer, M., Hennig, C., Mauky, E., Liebetrau, J. & Thrän, D. (2016). *Flexibilisierung von Biogasanlagen in Deutschland - Ein Überblick zu technischen Ansätzen, rechtlichem Rahmen und Bedeutung für das Energiesystem.* Deutsch-Französisches Büro für erneuerbare Energien & Deutsches Biomassefoschungszentrum (DBFZ), 22 S. Gesichtet am 19.4.2016: http://enr-ee.com/de/bioenergien/nachrichten/leser/flexibilisierung-von-biogasanlagen-in-deutschland.html

UBA (Umweltbundesamt 2012). *Glossar Ressourcenschutz.* Umweltbundesamt. Dessau. Gesichtet am 22.4.2016: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf

UBA (Umweltbundesamt 2013). *Biogaserzeugung und -nutzung: Ökologische Leitplanken für die Zukunft.* Vorschläge der Kommission Landwirtschaft beim Umweltbundesamt (KLU). Position Umweltbundesamt, Dessau. 26 S. Gesichtet am 24.24.2016: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/biogaserzeugung_und_-nutzung_oekologische_leitplanken_fuer_die_zukunft.pdf

UN (United Nation 1987). *Our Common Future.* New York. gesichtet am 2.12.2013. http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm

UN (United Nation 1992). *Agenda 21 Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung.* Rio de Janeiro. Gesichtet am 3.12.2013 http://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf

WBA (Wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2015). *Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung.* Gutachten, 425 S. Gesichtet am 4.4.2016: http://www.etracker.com/lnkcnt.php?et=dQsrB9&url=http%3A%2F%2Fwww.bmel.de%2FSharedDocs%2FDownloads%2FMinisterium%2FBeiraete%2FAgrarpolitik%2FGutachtenNutztierhaltung.pdf%3F__blob%3DpublicationFile&lnkname=GutachtenWBANutztierhaltung

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2008). *Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung.* Hauptgutachten 388 S. Berlin, ISBN 978-3-936191-21-9. Gesichtet am 24.4.2016: http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2008/wbgu_jg2008.pdf

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2011). *Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation.* Hauptgutachten, 420 S.ISBN 978-3-936191-38-7., Berlin. Gesichtet am 20.4.2016: http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2011/wbgu_jg2011.pdf

Wüste, A. (2013). *Akzeptanz verschiedener Bioenergienutzungskonzepte und Erfolgsfaktoren beim Ausbau dezentraler Bioenergieprojekte in Deutschland.* 170 S.; Cuvillier Verlag. Göttingen, ISBN-13: 978-3-95404-387-3

Zapf, M. (2017). *Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem.* Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. 283 S. ISBN: 978-3-658-15072-3

2 Schlüsselfragen zum Aufbau einer konfliktvermeidenden nachhaltigen Bioenergieproduktion und -versorgung

Die weiteren Kapitel 2.1 und 2.2 greifen die wichtigsten Fragen bezüglich einer nachhaltigen Bionenergieversorgung auf lokaler und regionaler Ebene auf. Damit soll dem Leser ein Überblick über die wichtigsten Ergebnisse des Projektes gegeben werden. Vertiefende Ausführungen zu den Ergebnissen der verschiedenen Projekte stehen dem Leser in Kapitel 3 zur Verfügung. In den Antworten zu den Schlüsselfragen sind Verweise zu den vertiefenden Kapiteln zu finden.

Im Rahmen der Beantwortung der Schlüsselfragen werden verschiedene Themenbereiche abgearbeitet. Dementsprechend werden auch unterschiedliche Zielgruppen angesprochen. Die Zielgruppen sind unterhalb des Titels erkennbar.

In Kapitel 4 werden die Schlüsselfragen nochmals aufgegriffen und Werkzeuge und Ergebnisse in Beziehung zu einander gesetzt. Damit soll dem Leser noch einmal aufgezeigt werden, wie die Ergebnisse, Instrumente und Produkte aus den einzelnen Teilprojekten miteinander vernetzt sind.

2.1 Schlüsselfragen auf lokaler Ebene: Konfliktvermeidung einer nachhaltigen Produktion und energetischen Nutzung von Biomasse auf lokaler und betrieblicher Ebene

2.1.1 Welche Prinzipien und Kriterien sollten im Rahmen einer nachhaltigen energetischen Biomassenutzung eine Rolle spielen?

Swantje Eigner-Thiel, Peter Schmuck, Nils Lerche

Zielgruppen: Landwirte, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Anlagenbetreiber, Naturschützer, Bürgermeister, Klimaschutzmanager

Nachhaltigkeitsprinzipien

Im Rahmen der Transformation hin zu nachhaltigen Lebensmustern reicht es nicht aus, gegenwärtige Vorgehensweisen wie etwa die Energieerzeugung aus endlichen Rohstoffen abzulösen durch Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen. Die wissenschaftliche Reflexion des Transformationsprozesses fordert dazu heraus, bei den angestrebten neuen Lebensmustern nach Möglichkeit von vornherein auch eine umfassende Einbettung in einen hochkomplexen Entwurf für ein „Leben danach" sicherzustellen. Das heißt für jeden der zu betrachtenden Lebensbereiche, also auch für die neuen Wege der Energieerzeugung, dass man sich auf Leitplanken einigt, die den Prinzipien nachhaltiger Entwicklung folgen, um erneute Schieflagen und Störungen des biosphärischen und gesellschaftlichen Gleichgewichts zu vermieden.

Wie schon in Kapitel 1.3.2 dargestellt, wurden dazu übergeordnete Prinzipien aufgestellt, die bei der energetischen Nutzung von Biomasse Beachtung finden müssen. Dabei handelt es sich in erster Linie um das *Achtungs- und das Vorsorgeprinzip*.

Das *Achtungsprinzip* beinhaltet die Achtung der Würde des Lebens und Bewahrung der Integrität aller Lebewesen und Erhaltung der Erde in ihrer Vielfalt. Alles, was existiert, ist voneinander abhängig; alles, was lebt, hat einen Wert in sich, unabhängig von seinem Nutzwert für die Menschen (nach Artikel 1 der Erd-Charta-Bewegung; Erd-Charta Koordination 2012). Der Schutz von Boden, Luft und Wasser vor lebensschädigenden Einflüssen hat, heruntergebrochen auf Bioenergieerzeugung, oberste Priorität.

Nach dem *Vorsorgeprinzip* sollten nach heutigem Wissen irreversible Eingriffe in die Ökosphäre unterlassen werden, um auch für die Zukunft alle Nutzungsoptionen offen zu halten. Bestehen wissenschaftliche und gesellschaftliche Bedenken oder Unsicherheiten hinsichtlich der Folgen, sollten diese Eingriffe unterbunden werden. So sollte gewährleistet sein, dass die in Biogasanlagen eingesetzten Substratmengen hinterher lokal und in der Nähe der Biogasanlagen wieder unter-

gebracht werden können, damit die Nährstoffe bedarfsgerecht zurückgeführt werden können (das ist in Regionen mit enormem Gülleanfall durch Massentierproduktion meist nicht gewährleistet). Biogasanlagen sollten nicht mit externen Spurenelementkonzentraten mit Nickel, Cobalt etc. für eine bessere Gasausbeute versetzt werden, um eine Anreicherung von Schadelementen in den Feldern, in die die Gärsubstrate verbracht werden, zu verhindern. Eine optimale Spurenelementzufuhr kann zum Beispiel durch Einbringung von Gülle und von Nickel- und Cobalt-anreichernden Energiepflanzen in die Biogasanlagen erreicht werden. Vor dem Anbau von Energiepflanzen auf kontaminierten Böden ist sicherzustellen, dass keine kontaminierten Gärreste auf unbelastete Böden gelangen. Gentechnisch veränderte Pflanzen sind nach diesem Prinzip abzulehnen, da die Langzeitfolgen des Anbaus und Nutzung von Genpflanzen nicht prognostiziert werden können (z.B. Müller et al. 2003).

Diesen beiden Prinzipien untergeordnet sind die vier Prinzipien der *Effizienz, der Konsistenz, der Gerechtigkeit und Suffizienz* sowie der *Partizipation,* welche bereits in Kapitel 1.3.2 genauer beschrieben wurden.

2.1.1.1 Kriterien

Wenn man verschiedene Techniken zur energetischen Nutzung von Biomasse in Bezug auf ihre Nachhaltigkeit vergleichen möchte, braucht man konkrete Kriterien dazu. Ausgehend von einem starken Nachhaltigkeitsverständnis und den Säulen der Nachhaltigkeit (Ökologie, Ökonomie und Soziales, ergänzt um den Aspekt der Technik) wurden Kategorien von Kriterien entwickelt, die in Tabelle 2-1 dargestellt sind. Hinter jeder Kategorie verbergen sich weitere Kriterien, die in Kapitel 3.1 genauer erläutert werden.

Um verschiedene Biomassenutzungspfade mit Hilfe dieser Kriterien miteinander zu vergleichen und hierüber eine Entscheidungsunterstützung für eine mögliche Realisierung zu erhalten, bieten sich Methoden der sog. „multikriteriellen Entscheidungsunterstützung“ (MCDA = **M**ultiple-**C**riteria **D**ecision **A**nalysis) an (Figueira et al. 2005), mittels derer verschiedene Alternativen anhand mehrerer Kriterien über die Anwendung mathematischer Methoden bewertet werden.

Ein Vorteil dieser MCDA-Methoden liegt darin begründet, dass der menschliche Verstand beim einfachen vergleichenden Betrachten der vielen Werte leicht überfordert wird. Die multikriterielle Entscheidungsunterstützung stellt daher einen Ansatz dar, komplexe Probleme strukturiert aufzubereiten und möglichst ganzheitlich zu erfassen. Zusätzlich werden über die Aufbereitung des Entscheidungsproblems weitere Informationen beschafft und die Vorlieben der Entscheidungsträger offengelegt. Hierdurch wird ein besseres Verständnis für das Problem geschaffen und somit die Basis für eine fundiertere Entscheidung bei den Entscheidungsträgern bereitet (Belton & Stewart 2002). Als Ergebnis der Anwendung einer MCDA-Methode wird in diesem Falle eine Reihenfolge der verschiedenen

Nutzungspfade bezüglich ihrer Nachhaltigkeit erzielt, die sich durch bestimmte numerische Werte darstellen lässt.

Tabelle 2-1: Nachhaltigkeitskriterien

Nachhaltig-keitsaspekt	Unterkategorie	Anzahl der Kriterien (ausführlich in Kap. 3-1 dargestellt)
Ökologie	Schutz von Luft und Klima	5
	Wasserschutz	3
	Bodenschutz	6
	Ressourcenschonung	5
	Erhalt der Biodiversität	3
Ökonomie	Interessen der Betreibergesellschaft	2
	Arbeitnehmerinteressen	2
	Stärkung der Wirtschaft in der Region	3
	Interessen der Wärme-kunden	3
	Interessen der Landwirte	2
Soziale Aspekte	Akzeptanz	5
	Partizipation	3
	Psychologische Auswirkungen	7
	Arbeitsplätze	2
Technik	Anlageneffizienz	4
	Transport	2
	Behördlicher Aufwand	1

Die erzielte Rangfolge basiert hierbei auf den getroffenen Annahmen sowie den geäußerten Präferenzen der Entscheidungsträger, sodass das Ergebnis nicht als „automatisierte" Handlungsempfehlung verstanden werden sollte, sondern als unterstützende Grundlage für Diskussionen hinsichtlich der Entscheidung. Das Ziel der MCDA liegt demnach in der Strukturierung und Aufbereitung eines komplexen Problems, der Generierung von Informationen sowie der Offenlegung von Präferenzen.

Die hier dargestellt Kriterienliste wurde für den Vergleich der drei Alternativen „Bioenergiedorf", „Biogasanlage eines einzelnen Landwirts" und „Biogasgroßanlage mit Gasaufbereitung" zusammengestellt. Wichtig ist, dass eine solche Liste für jeden Einzelfall wieder individuell verändert und auf die jeweilige Situation vor Ort (welche technischen Alternativen stehen zur Diskussion?) und auf die Bedürfnisse der Bevölkerung angepasst werden muss. Sie ist nicht als absolut gültig zu betrachten, sondern kann nur einen Anhaltspunkt zur Entscheidungsfindung und Weiterentwicklung möglicher Szenarien bieten.

Eine wichtige Rolle spielt die „Gewichtung" der einzelnen Kriterien: Ist beispielsweise ein Kriterium wie „Wertschöpfung in der Region" genauso wichtig wie der „Klimaschutz", oder sollte eines der Kriterien höher gewichtet werden? Diese

Gewichtungen fließen wiederum in die Berechnungen und damit in die Entscheidungsunterstützung ein.

Wenn für die genaue Auswahl der in die Berechnungen einfließenden Kriterien und die beschriebene Gewichtung tatsächlich die Bevölkerung des betroffenen Orts einbezogen wird, wird hier das übergeordnet Prinzip der Partizipation erfüllt.

Eine so beschriebene Entscheidungsunterstützung kann unterstützt werden durch bestimmte Werkzeuge oder Computerprogramme, wie im Folgenden dargestellt wird.

2.1.1.2 Angebotene Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung

Die MCDA-Methoden stellen eine vielversprechende Option dar, um Entscheidungsträger bei der Wahl nachhaltiger Biomassenutzungskonzepte zu unterstützen. Im Rahmen des Projekts wurde als geeignete Methode **PROMETHEE** (**P**reference **R**anking **O**rganisation **METH**od for **E**nrichment **E**valuations) (Brans et al. 1986) identifiziert und exemplarisch in einem niedersächsischen Dorf im Landkreis Wolfenbüttel angewendet. Die Durchführung sollte dabei grundsätzlich unter Leitung von Analysten erfolgen, die mit MCDA-Methoden vertraut sind.

Um auch zukünftig eine Anwendung durch potenzielle Analysten bei ähnlichen Entscheidungsproblemen zu ermöglichen, wurde ein computergestütztes Werkzeug zur Durchführung von PROMETHEE entwickelt. Es steht als sog. „Open Source-Software" öffentlich zur freien kostenlosen Verfügung. Dies ist dahingehend nötig, da aufgrund der Komplexität der betrachteten Probleme die Berechnung computergestützt erfolgen muss. Wichtige Eigenschaften der angebotenen Software sind hierbei, dass sie auch in deutscher und nicht nur in englischer Sprache eingesetzt werden kann und die Anwendung am Computer benutzerfreundlich gestaltet ist.

In der ersten Projektphase wurde die erwähnte Kriterienhierarchie im Rahmen einer exemplarischen Anwendung ermittelt (Eigner-Thiel et al. 2013). Innerhalb der interdisziplinär zusammengesetzten Projektgruppe konnte das Problem der Nachhaltigkeitsbewertung von Biomassenutzungskonzepten vielschichtig erfasst werden, sodass die erzielte gemeinsam erarbeitete Kriterienhierarchie eine geeignete Grundlage und Orientierung darstellt, um in Zukunft ähnliche Entscheidungsprobleme aufzubereiten.

Da die Anwendung einer MCDA-Methode auf die aktive Beteiligung der Entscheidungsträger (z. B. Bürgermeister) abzielt, ist es zudem wichtig, dass diese um die Wirkungsweise der Methoden sowie die Ideen dahinter wissen. Um die Entscheidungsträger daher bestmöglich im Vornerein zu informieren und Transparenz zu schaffen, wurde zudem ein nutzerorientierter Leitfaden verfasst (Geldermann & Lerche 2014), der bei zukünftigen Anwendungen an die betroffenen Entscheidungsträger ausgeteilt werden kann. Weiterhin stellt der Leitfaden eine Grundlage zum Wissenstransfer zu zukünftigen potenziellen Analysten dar.

Literatur

Belton, V. & Stewart, T.J. (2002). *Multiple Criteria Decision Making – An Integrated Approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Brans, J.P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24, 228-238.

Eigner-Thiel, S., Schmehl, M., Ibendorf, J. und Geldermann, J. (2013). Assessment of different bioenergy concepts regarding sustainable development. In Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J. (Hrsg.). *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach*. S. 339-384, Berlin: Springer.

Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Geldermann, J. & Lerche, N. (2014). *Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung – Methode: PROMETHEE*. Professur für Produktion und Logistik, Georg-August-Universität Göttingen, 69 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.uni-goettingen.de/de/171915.html

Müller, W, Miklau, M., Traxler, A., Pascher, K., Gaugitsch, H. & Heissenberger, A. (2003). Alternativen zu gentechnisch veränderten Pflanzen. *Umweltbundesamt Texte* 68-03, 151 S., Berlin.

2.1.2 Wie kann eine aktive Partizipation der lokalen Bevölkerung an einer Energiebereitstellung sichergestellt werden? Wie können Bioenergiekonzepte den lokalen Präferenzen angepasst werden?

André Wüste, Peter Schmuck, Karol Granoszewski

Zielgruppen: Landwirte, Bürgermeister, interessierte Bürger, Anlagenbetreiber, Naturschützer, Klimaschutzmanager, Regionalmanager

Der dynamische Ausbau der Bioenergienutzung geht mit einer zunehmenden Einflussnahme auf das Lebensumfeld der ländlichen Bevölkerung einher. Um den Prinzipien einer nachhaltigen Entwicklung (vgl. Kap. 1.3.2) gerecht zu werden, ist es daher unerlässlich, viele Menschen an Entscheidungsprozessen teilhaben zu lassen, die ihre Lebenswelt betreffen. In diesem Zusammenhang sollte die Partizipation nicht als Mittel zum Zweck, sondern als Selbstzweck verstanden werden, um demokratische Prozesse und Werte beim Ausbau der erneuerbaren Energien gewährleisten zu können.

Partizipation umfasst dabei nicht nur die Information, sondern auch die Beteiligung der Bürger an der Planung und Finanzierung der Bioenergieanlagen. Im Kontext der energetischen Nutzung von Biomasse ermöglichen vor allem dezentrale Bioenergieprojekte eine breitere Partizipationsmöglichkeit für unterschiedliche Akteure und bilden damit eine wesentliche Voraussetzung für Energieszenarien, die sich mit den Kriterien einer nachhaltigen Entwicklung vereinbaren lassen. Im Rahmen mehrerer Interviewstudien mit Initiatoren dezentraler, partizipativer Bioenergieprojekte (Bioenergiedörfer) konnten wesentliche Erfolgsfaktoren für eine aktive Partizipation der lokalen Bevölkerung ermittelt werden (siehe Kap. 3.8).

Eine wichtige Voraussetzung für eine umfassende Teilhabe der lokalen Bevölkerung an einem Bioenergieprojekt ist das Vorhandensein einer guten Dorfgemeinschaft, welche nicht durch schwerwiegende Konflikte beeinträchtigt ist. Ein Indiz dafür kann die erfolgreiche Realisierung anderer Gemeinschaftsprojekte sein.

Das Vorhandensein und die Unterstützung des Projektes von lokalen Entscheidungsträgern, die eine gewisse Vorbildfunktion ausüben (Bürgermeister, Pfarrer) sind als wesentliche Erfolgsfaktoren hervorzuheben.

Des Weiteren ist ein transparenter Informations- und Kommunikationsprozess von zentraler Wichtigkeit. Ein transparenter Beteiligungsprozess ist besonders bei der Offenlegung der Motivation aller am Projekt beteiligten Personen, bei der Standortwahl der Energieanlagen, bei wirtschaftlichen und finanziellen Aspekten und bei auftretenden Schwierigkeiten während der Projektrealisierung von hoher Bedeutung.

Auf Informationsveranstaltungen sollte man das Spektrum der positiven Begründungen für ein Bioenergieprojekt sehr breit fächern und die damit verbundenen Chancen wie Klimaschutz oder regionale Wertschöpfung diskutieren. Ebenso

müssen etwaige Befürchtungen seitens der lokalen Bevölkerung vor Beeinträchtigungen durch die Bioenergienutzung thematisiert und ernst genommen werden. Dies betrifft vor allem den Standort und die Größe der Anlage, die einzusetzenden Rohstoffe für die Bioenergiebereitstellung, aber auch die Form der Betreibergesellschaft.

Eine motivierende Wirkung können Besuchsfahrten zu bereits realisierten kommunalen Energieprojekten haben (siehe Kap. 2.1.5, 3.8). Bei der Besichtigung von Modellanlagen können die Bürger sich direkt vor Ort mit der Technik beschäftigen und Ideen für das eigene Projekt eingeholt werden.

Insbesondere bei Personen, die einem gemeinschaftlichen Bioenergieprojekt skeptisch gegenüberstehen, ist es ratsam, deren Kritiken und Bedenken in einem persönlichen Gespräch zu erörtern. Damit das Bioenergieprojekt von Menschen aller politischen Gruppierungen gewollt wird, ist es ratsam das Projekt nicht für Parteiinteressen zu mobilisieren. Des Weiteren kann die Einbindung externer Experten die Organisation und Moderation sozialer Prozesse erheblich erleichtern.

Der Einbezug der lokalen Bevölkerung in projektplanerische Tätigkeiten und die Nutzung der im Dorf vorhandenen Kompetenzen kann durch die Einrichtung von regelmäßig stattfindenden Arbeitsgruppensitzungen mit spezifischen Thematiken erfolgen.

Im Hinblick auf eine breite finanzielle Partizipation der Anwohner an einer Bioenergieanlage empfiehlt sich das Betreibermodell der Genossenschaft.

Für die Anpassung an lokale Präferenzen empfiehlt es sich, eine regionale Bioenergiestrategie zu beraten und mit Hilfe der lokalpolitischen Entscheidungsgremien entsprechende Ziele möglichst konkret in Beschlüssen zu verankern. Hierbei ist einerseits abzuwägen, welche Rolle die verschiedenen regional verfügbaren Biomasseressourcen (Rest- und Abfallbiomasse, Energiepflanzen, Waldholz) spielen sollen. Hier sollte allgemein eine Priorität auf diejenigen Rohstoffe gelegt werden, für welche keine konkurrierenden Nutzungsmöglichkeiten vorliegen wie z.B. Abfallbiomasse. Zum anderen ist abzuwägen, ob die Flächen für den Energiepflanzenanbau oder für andere erneuerbare Energieträger genutzt werden sollen bzw. welche Synergien durch die verschiedenen erneuerbaren Energieträger möglich sind bzw. welche Energieform bei gleichem energetischem Ertrag mit dem geringsten Flächenverbrauch einhergeht. Hierzu kann das Planungsinstrument 100prosim von Schmidt-Kahnefeld (2017) verwendet werden, welches in bislang 38 Landkreisen, darunter den Modelllandkreisen unseres Projektes, erfolgreich zur Sensibilisierung für die Beschränktheit der verfügbaren Fläche eingesetzt wurde.

Beim Energiepflanzenanbau können Maßnahmen wie die Anlage von Blühstreifen an Radwegen die Akzeptanz der ansässigen Bevölkerung steigern und Monokulturen entgegenwirken (siehe Kap. 3.3, 3.5).

In lokalen Entscheidungs- und Gestaltungsprozessen über den Ausbau der Energieerzeugung aus Biomasse ist neben der Partizipation potenzieller Energieabnehmer auch die Mitwirkungsbereitschaft von Landwirten unter dem Aspekt der Sicherung der Rohstoffbasis von hoher Relevanz. Am Beispiel der Biogaserzeu-

gung konnte empirisch aufgezeigt werden, dass intrinsische Motive wie Umweltverantwortung und Technikinteresse für Landwirte größerer Betriebe überraschend wenig bei Entscheidungen zur Investition in entsprechende Anlagen hineinspielen (Kap. 3.6). Vielmehr haben extrinsische Anreize in Form attraktiver Einspeisetarife Landwirte zur Investition bewegt. Demzufolge ist das Aktivierungspotenzial innerer Motive zur Partizipation an Bioenergieprojekten begrenzt. Bei sinkenden Einspeisetarifen könnte jedoch eine Aufklärung über deren ökologischen Vorzüge und technischen Innovationen z.B. durch entsprechende Beratungsangebote der landwirtschaftlichen Beratung bzw. kommunalen Energieberatung stärker fokussiert werden.

Anhand durchgeführter Befragungen von Landwirten konnte ferner eine ausgesprochen hohe soziale Orientierung dieses Berufsstandes belegt werden. Folglich sollten Projektinitiatoren das familiäre und berufliche Umfeld von Landwirten z. B. durch Teilnahme an Planungsworkshops einbinden. Die im dörflichen Kommunikationsnetzwerk resultierende Auseinandersetzung mit dem Thema Bioenergie könnte dazu beitragen, Diffusionsbarrieren abzubauen. Dieser kommunale Dialog sollte mit breit angelegten Informationskampagnen unterstützt werden (siehe Kap. 3.6, 3.7).

Ähnlich wie der überwiegende Anteil der lokalen Bevölkerung präferieren auch Landwirte laut der Befragung eine dezentrale Energieerzeugung. Für Landwirte ergeben sich höhere Wertschöpfungsmöglichkeiten durch finanzielle und organisatorische Beteiligung an der Anlage. Insofern sind kommunale Partnerschaften von Landwirten, Kommune und Bürgern durch eingebettet z.B. in genossenschaftliche Strukturen zu empfehlen und sollten Vorrang bei Genehmigungsprozessen haben.

Ein Werkzeug, um eine aktive Partizipation der betroffenen Bevölkerung zu ermöglichen, stellt die Anwendung einer MCDA-Methode zur Entscheidungsunterstützung dar (s. Kap. 2.1.1, 3.1). Da das Ziel einer MCDA darin liegt, im Zusammenspiel mit den Entscheidungsträgern das Problem strukturiert aufzubereiten und die persönlichen Präferenzen offenzulegen, ist die Partizipation ein wesentlicher Bestandteil. Wird eine MCDA-Methode angewendet, um nachhaltige Biomassenutzungskonzepte zu identifizieren, so kann die Partizipation an verschiedenen Stellen erfolgen. Einerseits werden die Entscheidungsträger bei der Ermittlung von Kriterien sowie der damit verbundenen Präferenzfunktionen aktiv in den Entscheidungsprozess einbezogen. Grundlage für die Festlegung der Nachhaltigkeitskriterien kann hierbei die zur Verfügung gestellte Kriterienhierarchie aus der ersten Projektphase sein, wobei die Präferenzen und Zuordnung der individuellen Gewichtungen der einzelnen Kriterien durch die beteiligten Personen erfolgt.

Um die benötigten Daten zu erheben und die Bevölkerung dann tatsächlich am Entscheidungsprozess zu beteiligen, empfiehlt sich die Durchführung von Planungswerkstätten. Innerhalb dieser erläutert ein sogenannter „Analyst" den Entscheidungsträgern die Wirkungsweise der Methode, erhebt die Kriterien und die Größen wie z.B. Gewichtungen. Hierdurch wird ein transparentes Vorgehen ge-

schaffen und den Beteiligten ermöglicht, sich aktiv in die Entscheidung einzubringen, wodurch die Akzeptanz für das Ergebnis erhöht wird.

Literatur

Schmidt-Kahnefendt, H.-H. (2017). *Zielperspektiven entwickeln für 100%-Erneuerbare-Energien-Regionen*. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.wattweg.net

2.1.3 Wie können ökologisch sensible landwirtschaftliche Flächen identifiziert werden? Welche Auswirkungen hat die Nutzung dieser Flächen? Wie kann die Produktion und Nutzung von Bioenergie positive Wirkungen auf Klima-, Wasser-, Boden und Artenschutz entfalten?

Marianne Karpenstein-Machan, Christina von Haaren, Roland Bauböck, Michael Rode, Wiebke Saathoff

Zielgruppen: Landwirte, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager

Diese Fragen für dieses und das nächste Kapitel werden hier nicht abstrakt, sondern auf Basis der beispielhaften Ergebnisse und Vorschäge in verschiedenen Modelllandkreise und Modellbetriebe beantwortet.

2.1.3.1 *Was sind ökologisch sensible landwirtschaftliche Flächen?*

Hierunter versteht man landwirtschaftliche Nutzflächen, auf denen bei nichtangepasster Wirtschaftsweise starke Auswirkungen auf Klima, Boden, Wasser und Artenschutz (Umweltwirkungen) zu erwarten sind.

Darunter fallen z. B. Standorte und Böden die zur Bodenverdichtung, zur Bodenerosion (Wind- und Wassererosion), zur Verlagerung und Auswaschung von Nährstoffen und zum Humusabbau und in Folge zur Freisetzung von klimawirksamen Emissionen neigen. Marginale Standorte (nährstoffarme, flachgründige Böden) können zum Beispiel einen hohen Biotopwert haben, d. h. sie beheimaten eine große Artenvielfalt und seltene Arten, die durch intensive landwirtschaftliche Nutzung in ihrem Bestand gefährdet werden können.

Werden auf mit Schadelementen kontaminierten Standorten Lebens- und Futtermittel angebaut, besteht durch den Transfer der Schadstoffe aus dem Boden in die Ernteprodukte eine direkte Gesundheitsgefährdung von Mensch und Tier.

2.1.3.2 Identifizierung der ökologisch sensiblen Flächen und mögliche Umweltwirkungen durch die landwirtschaftliche Nutzung

Modelllandkreise

In den drei bearbeiteten niedersächsischen Modelllandkreisen Region Hannover, Goslar und Wolfenbüttel sind sehr heterogene landwirtschaftliche Standortverhältnisse anzutreffen und dementsprechend unterscheidet sich die Ertragsfähigkeit der Böden stark. In allen drei Landkreisen liegen auch ökologisch sensible Flächen vor. In der Region Hannover stellen insbesondere viele potenziell nitratauswaschungsgefährdete Sandstandorte eine Gefahr für das Grund- und Trinkwasser dar. Ackerbaulich und als Intensivgrünland genutzte Niedermoore belasten das

Klima durch CO_2- und N_2O-Freisetzungen (s. Kap. 3.5). Darüber hinaus wird durch den starken Humusabbau die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt. Im Landkreis Goslar sind die flachgründigen Karststandorte in den Vorgebirgslagen des Harzes auswaschungsgefährdet. Im Landkreis Wolfenbüttel sind mit Ackerzahlen bis zu 100 (tiefgründige Lösslehme) die ackerbaulich besten Böden anzutreffen. Die schluffreichen Lösslehme neigen bei nichtangepasster Wirtschaftsweise zu Bodenerosion und Bodenverdichtung. Bodenerosion kann über den Nährstoffeintrag (insbesondere durch N und P) zur Eutrophierung der Gewässer führen. Bodenverdichtungen können Lachgasfreisetzung des Bodens auslösen und damit den Treibhausgaseffekt verstärken. Besonders prekär ist die ackerbauliche Bewirtschaftung von Niedermoorflächen in der Region Wolfenbüttel. Dort konnten bereits in den 70er Jahren starke Mineralisierungsraten durch Messungen belegt werden (Eggelsmann & Bartels 1975). Hohe Nitrateinträge ins Grundwasser, CO_2- und N_2O-Emissionen sind hier die Folge (s. Kap. 3.5). Des Weiteren weisen organische Böden die höchst mögliche Winderosionsgefährdung auf. Ungünstig zu bewerten ist, dass auf vielen empfindlichen Standorten Mais angebaut wird, was den tatsächlichen Bodenabtrag besonders begünstigt, da Maisbestände den Boden im Frühjahr im Vergleich zu anderen Sommerkulturen erst spät bedecken und damit bis in den Juni hinein keinen ausreichenden Erosionsschutz bieten.

Abbildung 2-1 zeigt beispielhaft für die Region Hannover die nitratauswaschungsgefährdeten Sandböden.

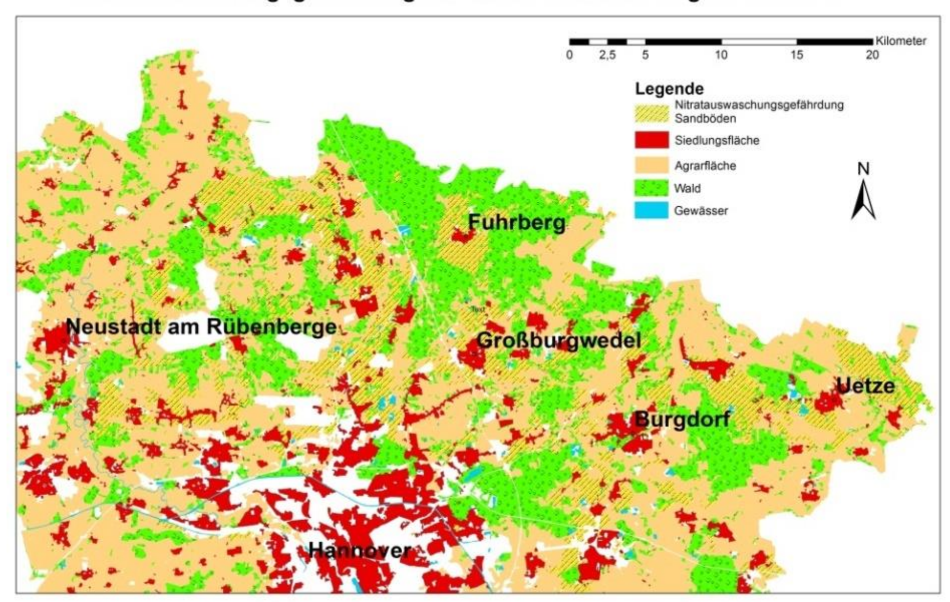


Abbildung 2-1: Die Region Hannover mit ihren nitratauswaschungsgefährdeten Sandböden

Sowohl im Landkreis Goslar als auch im Landkreis Wolfenbüttel sind längs der Flüsse Oker und Innerste mit Schwermetallen kontaminierte landwirtschaftliche Nutzflächen anzutreffen, deren Erntegut sowohl für Mensch und Tier eine potenzielle Gefahr für die Gesundheit darstellt (s. Kap. 3.10).

Modellbetriebe

In allen drei Landkreisen wurden konventionell bewirtschaftete landwirtschaftliche Modellbetriebe ausgewählt, die die heterogenen Standortverhältnisse der Landkreise widerspiegeln und auf denen auch eine Vielzahl von ökologisch sensiblen Flächen vorzufinden sind. Die landwirtschaftlichen Betriebe repräsentieren die typischen Fruchtfolgen der Regionen. Durch die Beteiligung der Landwirte an Biogasanlagen werden auch auf allen drei Betrieben Energiepflanzen, vornehmlich Silomais, angebaut.

Durch die Auswertung digitalen Kartenmaterials und die Anwendung der Umweltsoftware MANUELA (s. Kap. 3.4, 3.5) wurden empfindliche Standorte ermittelt, die für die Artenvielfalt und die CO_2-Speicherung auf den drei Testbetrieben eine besondere Bedeutung haben. Die Biodiversität von Standorten kann empfindlich auf Nutzungseinflüssen wie Düngemittel- und Pestizideintrag und Landnutzungsänderungen reagieren, und ist insbesonders gravierend, wenn sie oder aber auch angrenzende Standorte wertvolle Arten beheimaten. So befinden sich z.B. einige Bereiche des Modellbetriebes in der Region Hannover in Landschaftsschutzgebieten, andere grenzen unmittelbar an ein Naturschutzgebiet, FFH-Gebiet (Fauna-Flora-Habitat-Gebiet) oder an als wertvolle Bereiche für die Fauna ausgewiesene Flächen an. Eine überhöhte Düngung mit Nitrateinträgen in diese Biotope, die Abdrift von Pflanzenschutzmitteln und die Beeinträchtigung von Biotopverbundkorridoren sind mögliche, durch die Bewirtschaftung ausgelöste Störfaktoren, die es hier zu vermeiden gilt. Auf dem Modellbetrieb im Landkreis Wolfenbüttel überlagern sich die empfindlichen Bereiche für Artenschutz und Klimaschutz, da das stark klimarelevante Niedermoorgebiet ebenfalls als Bereich mit lokaler Bedeutung für Brutvögel ausgewiesen ist. Ein weiterer Indikator für empfindliche Standorte für den Artenschutz ist das Biotopentwicklungspotenzial (BEP). Ein BEP für eine „stark spezialisierte schutzwürdige Vegetation“ konnte für einige Karststandorte des Goslarer Betriebs festgestellt werden. Damit sich das BEP entfalten kann, bedarf es jedoch einer extensiven Bewirtschaftung. Im Falle von Grasland können hier z. B. für Flora und Fauna wertvolle Kalkmagerrasen erhalten, bzw. wieder etabliert werden. Die Entwicklung seltener kalkliebender Ackerbegleitflora erfordert eine extensive Ackernutzung, die aber auch partiell (s. Kap. 3.5) erfolgen kann. Flächenmäßig hat der Modellbetrieb im Landkreis Wolfenbüttel mit seinen hohen Niedermooranteilen den größten Anteil wertvoller Flächen, in denen Kohlenstoff gespeichert ist. Allerdings befinden sich diese ausschließlich unter ackerbaulichem Einfluss, was hohe CO_2- und N_2O- Emissionen erwarten lässt. Der Modellbetrieb in der Region Hannover hat ebenfalls einige wenige Niedermoorflächen, die als Intensivgrünland und Acker bewirtschaftet

werden. Auch hier ist mit hohen CO_2-Emissionen zu rechnen. Zwar wird auf Grünland in der Regel weniger CO_2 freigesetzt als auf Ackerland, bei intensiver Grünlandbewirtschaftung können jedoch die CO_2-Emissionen fast an diejenigen der Ackerstandorte heranreichen.

2.1.3.3 Erprobung eines „Integrativen Energiepflanzenanbaus“

In allen Modellbetrieben wurden im Sinne eines integrativen Energiepflanzenbaus (s. Kap. 3.3) neue Kulturen und Anbaukonzepte getestet, um den Anbau der Energiepflanzen im Mix mit Nahrungs- und Futtermittelanbau ökologisch und ökonomisch zu optimieren. Hierbei stand neben der Optimierung der gesamten Anbaufläche des Betriebes auch die Verbesserung des ökologischen Status der sensiblen Flächen im Fokus. Neben der ackerbaulichen Optimierung, auf der Grundlage der klassischen Ackerbaulehre und als Ergebnis aus Gesprächen mit den Landwirten, wurde auch eine ökonomische und naturschutzfachliche Optimierung mit Hilfe eines linearen Programmierungsmodells (LP) durchgeführt.

2.1.3.4 Optimierungen in den Modellbetrieben

Ackerbauliche Optimierung

Alle drei untersuchten Betriebe weisen sehr enge Fruchtfolgen auf und die Anzahl der kultivierten Kulturen auf Betriebsebene ist sehr gering (s. Abb. 2-2). Diese eingeschränkte Kulturartenzahl ist die Hauptursache für die abnehmende biologische Vielfalt in der Landschaft und verursacht auf der Betriebsebene einen hohen Aufwand an Pflanzenschutz- und Düngemitteln, um das bisherige Ertragsniveau zu halten.

Hier galt es bei den Maßnahmen anzusetzen. In den Anbauversuchen wurden einjährige und mehrjährige Energiekulturen getestet, die sowohl den Mais ersetzen können, aber auch in weizenreichen eintönigen Fruchtfolgen den Weizenanteil in der Fruchtfolge reduzieren. Zur Erhöhung der Artenvielfalt in den Energiefruchtfolgen haben sich besonders Winterroggen und Wintertriticale als Alternative und Ergänzung zum Mais bewährt. Beide Kulturen können im Mischanbau mit Winterwicke und mit einer Grasuntersaat kultiviert werden. Diese Mischungen erhöhen die Artenvielfalt und stabilisieren die Erträge. Die Grasuntersaat wächst nach der Ernte weiter und trägt zum Humusaufbau bei. Als Alternative zur Untersaat können auch Ackergras oder Zwischenfrüchte wie Phacelia, Ackersenf, Buchweizen angebaut werden. Das biomassereiche, schnellwüchsige Ackergras liefert im Herbst und im Frühjahr jeweils einen Ernteschnitt, während die Zwischenfrüchte in der Regel auf den fruchtbaren Standorten in den Landkreisen Goslar und Wolfenbüttel aufgrund ihrer hohen Wassergehalte im Herbst nicht geerntet werden, über Winter erfrieren und die Biomasse zum Humusaufbau dient. Sudangras als Zweitkultur nach Wintergetreideganzpflanzen hat sich nur auf den Sandstandorten in der Region Hannover bewährt, da es dort auf den wärmeren und trockeneren Standorten einen höheren Reifegrad und damit höhere Trockensubstanzgehalte

erreicht. Zum weiterem Humusaufbau, bzw. Humusbilanzausgleich wurden Untersaaten zu Mais auf allen Standorten getestet. Erfolgreich waren sie insbesondere auf den sandigen Standorten in der Region Hannover. Aber auch auf fruchtbaren Niedermoorstandorten lassen sie sich etablieren (s. Kap. 3.3).



Abbildung 2-2: „Ausgeräumte" Landschaft mit hohen Winterweizenanteilen im Landkreis Wolfenbüttel (Foto: Karpenstein-Machan)

Durch Mischfruchtfolgen mit Energie- und Nahrungskulturen allein lässt sich jedoch der Humusabbau auf den Niedermoorböden nicht stoppen. Im Vergleich zu einjährigen Kulturen wäre hier der Anbau von Dauerkulturen, die nicht der wiederholten Bodenbearbeitung unterliegen, die bessere Alternative, um den Humusabbau zumindest zu verlangsamen. Erste Humusanalysen des Mineralbodens des Wolfenbüttler Betriebes zeigen, dass der Boden unter der durchwachsenen Silphie (Silphium perfoliatum L.) nach dreijährigem Anbau höhere Humusgehalte aufweist, als der Referenzstandort, auf dem eine Zuckerrüben/Mais/Getreidefruchtfolge steht (s. Kap. 3.3.3). Auch auf nitratauswaschungsgefährdeten Karst- und Sandstandorten der Betriebe in Goslar und der Region Hannover stellen Dauerkulturen eine umweltfreundliche Alternative zu Mais dar. Unter den geprüften Dauerkulturen kann die durchwachsene Silphie ertraglich am besten mit dem Mais konkurrieren. Silphie, die der Familie der Korbblütler angehört, bietet durch ihre langanhaltende Blüte bis in den Herbst hinein Bienen und Insekten eine ausgezeichnete Nahrungsquelle an.

Naturschutzfachliche Optimierung

Im Anschluss an die Bestandsaufnahme und Bewertung hinsichtlich der Bedeutung der betrieblichen Flächen für den Arten- und Klimaschutz wurden Maßnahmen zur naturschutzfachlichen Optimierung der Flächenbewirtschaftung abgeleitet. Im Rahmen qualitativer Interviews wurden den drei Modelllandwirten die Ergebnisse und Maßnahmenvorschläge präsentiert. Die Landwirte wurden befragt, zu welchen Bedingungen sie sich eine entsprechende Anpassung vorstellen könnten. Die Flächen der drei Testbetriebe sind kaum arrondiert und liegen z.T. weit verstreut in der Landschaft. Da viele Tierarten jedoch über die Schlaggrenzen hinaus auf Landschaftsebene agieren, sagt die Fruchtartendiversität des einzelnen Betriebes nur wenig über die Lebensraumqualität für wandernde Tierarten aus. Die Betrachtung der Fruchtartendiversität auf Landschaftsebene ist daher für den Artenschutz essentiell. In allen drei Gebieten der Testbetriebe sind benachbarte Schläge häufig mit den gleichen Kulturarten bestellt. So ist der langgestreckte Niedermoorgürtel im Süden des Wolfenbütteler Betriebes quasi flächendeckend mit Mais kultiviert. Für die Aufwertung der Lebensraumqualität von Arten war daher ein zentraler Maßnahmenvorschlag, die Fruchtfolge mit den Bewirtschaftern benachbarter Flächen abzusprechen. Ziel dieser Maßnahme war es zu vermeiden, dass zu einem Zeitpunkt weiträumig die gleiche Kultur auf aneinandergrenzenden Flächen angebaut wird und dadurch u.a. Nahrungs- und Deckungshabitate verloren gehen. Ein weiterer Vorschlag zur Auflockerung der Fruchtartenvielfalt und zur Vermehrung der Habitatvielfalt war die Erhöhung des Anteils an Sommergetreide (10-30%) und damit verbunden auch das teilweise Stehenlassen von Stoppeln in der Winterzeit. Als Sommerung sollte der Sommerhafer in die Fruchtfolge integriert werden. Dies hätte eine Unterbrechung des intensiven Pflanzenschutzmitteleinsatzes der Winterungen mit positiver Wirkung auf Arten- und Gewässerschutz zur Folge.

Aufgrund des hohen Biotopentwicklungspotenzials wurde dem Goslarer Betrieb die Anlage von Ackerrandstreifen vorgeschlagen. Wenn Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen unterbleiben, besteht hier ein hohes Potenzial, dass sich eine kalkliebende Ackerbegleitflora mit seltenen, geschützten Arten entwickelt. Weitere Maßnahmenvorschläge waren Blühstreifen, der Schutz bestehender Landschaftselemente (z. B. Kalkmagerrasen, Säume, Hecken, Feldgehölze, Baumreihen) sowie deren Neu-Etablierung zur Vernetzung von Biotopen in der Feldmark.

2.1.4 Welche Umweltwirkungen werden durch die Etablierung eines integrativen Energiepflanzenbaus erwartet und welche Auswirkungen hat die Umstellung der Betriebe auf die Ökonomie?

Marianne Karpenstein-Machan, Christina von Haaren, Roland Bauböck, Michael Rode, Wiebke Saathoff

Zielgruppen: Landwirte, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager

2.1.4.1 Ausgeglichene Humusbilanz

Allen drei Landwirten der Modellbetriebe wurden auf Basis der durchgeführten Versuche und Analysen Vorschläge unterbreitet, wie sie ihre Fruchtfolgen pflanzenbaulich und ökologisch optimieren können, um die Ertragsfähigkeit ihrer Böden langfristig zu sichern. Bei der Optimierung wurde besonders auf eine ausgeglichene Humusbilanz und eine Diversifizierung des Anbaus geachtet. Auf ökologisch sensiblen Flächen, wie Karst- und Niedermoorstandorten wurden zum Teil Dauerkulturen vorgesehen.

Im Status quo weisen alle drei Modellbetriebe negative Humusbilanzen auf. Durch die Umstellung der Fruchtfolgen können in allen drei Betrieben, ohne den Biomasseanbau für die Biogasanlage einzuschränken, ausgeglichene bzw. kohlenstoffaufbauende Humusbilanzen erreicht werden. Durch die Dauerkultur Silphie wurde der C-Gehalt im Boden signifikant im Vergleich zu der Referenzkultur Mais erhöht (s. Kap 3.3.3).

2.1.4.2 Erhöhte Artenvielfalt bei Flora und Fauna

Die Kulturartenvielfalt wird durch die Umstellung der Fruchtfolgen und die Integration von neuen Kulturarten sowohl auf Betriebsebene als auch auf Schlagebene auf die doppelte Anzahl erhöht (s. Kap. 3.3.3). Daraus lassen sich auch positive Auswirkungen auf Fauna und Flora ableiten. Eine gesteigerte Kulturartenvielfalt und Verteilung der Kulturarten erhöht auch die Strukturvielfalt in räumlicher und zeitlicher Sicht. Dies ist für Flora und Fauna von besonderer Bedeutung. Mit der Kulturart wechselt auch die Ackerbegleitflora, u.a. bedingt durch unterschiedlichen Nährstoffhaushalt und Bodenbedeckungsgrad. Mit steigender Kulturartenvielfalt steigt also potenziell auch die Artenzahl der Ackerbegleitflora. Die tatsächliche Steigerungsrate hängt auch vom Einsatz der Pflanzenschutzmittel ab. Zeitliche Unterschiede im Bodenbedeckungsgrad, bei den Entwicklungsstadien der Pflanzen (Phänologie) und bei den Erntezeitpunkten führen dazu, dass die Tierwelt zu unterschiedlichen Jahreszeiten Nahrungs- und Deckungshabitate vorfindet. Eine erhöhte Kulturartenanzahl wird zudem von einem höheren Anteil an Übergangsstrukturen begleitet. Sind Vorkommen wichtiger Randstrukturen wie Säume

und Hecken vor allem durch die Schlaggröße bedingt, so entstehen zusätzlich durch die Benachbarung unterschiedlicher Kulturarten unterschiedlicher Höhe gewisse Übergangseffekte zwischen den Kulturen. So bewirkt die Höhendifferenz z.B. ein windberuhigtes Mikroklima, von dem sich bestimmte Insekten angezogen fühlen können. Dies kann sich wiederum vorteilhaft auf deren Fressfeinde (z.B. Feldlerche) auswirken.

2.1.4.3 Stabilisierung der Erträge von Nahrungs- und Biomassekulturen

Mit dem Pflanzenmodell BioSTAR lassen sich großräumige (z. B. auf den Landkreis bezogene) oder schlagspezifische Biomassepotenziale für Ackerkulturen ermitteln (siehe Kap. 3.4). Bei der Einführung von ökologisch optimierten Fruchtfolgen auf einem Betrieb, in dem bereits Energiepflanzen für eine Biogasanlage angebaut werden, kann BioSTAR für die Berechnung von Biomasseerträgen dieser neuen Fruchtfolgen herangezogen werden. Auf diese Weise kann insbesondere für Kulturen, die dem Landwirt nicht aus der eigenen Praxis bekannt sind, eine bessere Ertragsabschätzung gemacht und alte mit neuen Fruchtfolgen verglichen werden.

Im folgenden Beispiel wurde das Ertragsbiomassepotential einer traditionellen Fruchtfolge (Mais als Energiepflanze) mit dem einer ökologisch optimierten Fruchtfolge (Mais, Triticale-GPS und Ackergras als Energiepflanzen) untersucht. Der Betrieb baut auf einer Gesamtfläche von 253 ha Marktfrüchte und Energiepflanzen an. Die Energiepflanzen befinden sich vorwiegend auf den ertragreicheren Niedermoorstandorten. Die neue Fruchtfolge erbringt bei der Modellierung 3% mehr Gesamtbiomasse als die alte (also kaum eine Änderung), wobei sich die Verteilung zwischen Energiebiomasse und Nahrungsmittelmenge verschiebt (s. auch Kap. 3.3). Die neuen Fruchtfolgen generieren 15 % weniger Nahrungsmittelmenge aber 18% mehr Biomassemenge. Im Hinblick auf die Kalorien reduziert sich die Menge der Nahrungsmittelkalorien um 4% und die Biomassekalorien steigen um 25%. Der Wasserverbrauch der neuen Fruchtfolgen erhöht sich um insgesamt 8%.

2.1.4.4 Ökonomische Auswirkungen der pflanzenbaulichen und naturschutzfachlichen Optimierung der Betriebe

Mittels einer um ein zusätzliches Bewertungsverfahren zur Vorfrucht-Nachfrucht-Kombinationseignung erweiterten Linearen Programmierung (LP) können Auswirkungen pflanzenbaulicher und naturschutzfachlicher Vorgaben auf das Anbauprogramm eines Betriebes ökonomisch bewertet werden. Im nachfolgend beschriebenen Modellbetrieb, der Nahrungs-, Futter- und Energiepflanzen anbaut, wird das gegenwärtige Anbauprogramm (Status quo) den Varianten ökonomische Optimierung, pflanzenbauliche Optimierung und naturschutzfachliche Optimierung gegenübergestellt. Da Fruchtfolgeeffekte und Cross-Compliance-Anforderungen generell in allen Optimierungsvarianten Berücksichtigung finden, werden nur Fruchtfolgen vorgeschlagen, die der guten fachlichen Praxis entsprechen. In

der pflanzenbaulich optimierten Variante werden weitergehende sinnvolle Restriktionen formuliert, die einzelne Pflanzenarten aus phytosanitären Gründen in ihrem Anbauumfang limitieren, bzw. Blühstreifen im Mais generell zur Bereicherung der Artenvielfalt vorsehen. Diese Optimierungsvariante trägt einer effizienten Nutzung von Betriebsmitteln (Düngung und Pflanzenschutz) und einer Ökologisierung der Landnutzung Rechnung. Die naturschutzfachliche Optimierung baut auf der pflanzenbaulichen auf, es werden jedoch weitere Restriktionen formuliert, die insbesondere dem Schutz wertvoller Ackerbegleitflora und -fauna dienen (s. Kap. 3.3).

Alle Optimierungsvarianten führen zu einem höheren Gesamtdeckungsbeitrag (GDB) des Modellbetriebes. Die ökonomische Optimierung liegt mit 6% über dem derzeitigen Status quo des Betriebes, die pflanzenbauliche Optimierung erreicht eine 5 %-ige Steigerung des GDB und die naturschutzfachliche Optimierung liegt mit 1 % höherem GDB auf dem Niveau des Status quo. Eine Umstellung des Betriebes auf eine artenreichere, umweltfreundlichere und gesündere Fruchtfolge mit einer ausgeglichenen Humusbilanz würde somit die Betriebe finanziell nicht oder wenig belasten, sondern mittelfristig möglicherweise sogar über höhere Humusgehalte zu einer Erhöhung der Erträge, zumindest aber zu einer Stabilisierung der Erträge beitragen.

2.1.5 Sind die Landwirte bereit, empfohlene Maßnahmen zum integrativen Energiepflanzenbau umzusetzen?

Marianne Karpenstein-Machan, Christina von Haaren, Roland Bauböck, Michael Rode, Wiebke Saathoff

Zielgruppen: Landwirte, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager

2.1.5.1 Ackerbauliche Maßnahmen

In allen drei Modellbetrieben wurden einzelne empfohlene Maßnahmen zur ackerbaulichen Optimierung umgesetzt. In den Betrieben 1 und 2 wurde Silphium perfoliatum L. als Dauerkultur auf jeweils ca. 2 ha auf ackerbaulich sensiblen Standorten (Niedermoor und Karstboden) angebaut. In Betrieb 2 wurden zusätzlich auf den Niedermoorstandorten noch Sida hermaphrodita (nordamerikanische Malve) und zwei Agropyron-Dauergräser (Ungarisches Riesenweizengras und ungarisches Hirschhorngras) etabliert. Auf einem Standort neben einem naturnahen Biotop wurde eine mehrjährige Wildpflanzenmischung für die Nutzung als Biogassubstrat angebaut. Diese Maßnahmen haben langjährige Auswirkungen auf das Betriebsergebnis und auf die Umweltwirkungen, da bei den Dauerkulturen von einer Standzeit von mindestens 10 Jahren ausgegangen werden kann. In Bezug auf die Fruchtfolgen haben alle drei Betriebe Wintergetreideganzpflanzen in die Fruchtfolge aufgenommen (je nach Standortgüte Wintertriticale oder Winterroggen). Dadurch ergeben sich auch optimierte Fruchtfolgen, da als Folgefrucht Ackergras, Zwischenfrüchte oder Winterraps folgen, so dass die Anteile an Mais bzw. Winterweizen am Anbauumfang geringer wurden. Folgt Mais auf Mais in der Fruchtfolge wird in der 2. Kultur eine Untersaat eingesät. Ebenso haben sich die Sonnenblumenblühstreifen zu Mais als erfolgreich und hoch akzeptiert erwiesen, so dass ihr Anbau weiter fortgeführt wird.

2.1.5.2 Naturschutzfachliche Maßnahmen

Im Anschluss an die Bewertung des Status quo und Maßnahmenableitung hinsichtlich Arten- und Klimaschutz wurden die drei Testlandwirte befragt, zu welchen Bedingungen sie bereit wären, bestimmte Schutzmaßnahmen umzusetzen. Auf diese Weise sollten Kenntnisse zu den betrieblichen Kapazitäten sowie über die Motive der Landwirte, die vorgeschlagenen Maßnahmen umzusetzen, gewonnen werden. Dies sind grundlegende Informationen um festzustellen, welche Maßnahmen eines ökologisch optimierten Energiepflanzenanbaus auf der Betriebsebene initiiert werden können und welche Schutzmaßnahmen einen Steuerungsbedarf von höheren Planungsebenen erfordern.

Die im Zuge der Befragung vorgeschlagenen Maßnahmen wurden in solche mit Kostenaufwand und solche ohne nennenswerten Kostenaufwand unterteilt. Generell waren sich die Landwirte einig, dass Maßnahmen mit Kostenaufwand soweit entschädigt werden müssten, dass zumindest ein ausgeglichener Deckungsbeitrag vorliegt. Eine Ausnahme war hier eine Gehölzpflanzung. Für einen der drei Landwirte reichte es aus, die Materialkosten ersetzt zu bekommen. Ein anderer Testlandwirt hat bereits zahlreiche Gehölzstrukturen über die Jagd mit angelegt. Eine Materialerstattung wurde hier nicht gewünscht, da die Jäger selbst entscheiden wollten, wo und welche Gehölze sie pflanzen. Ein besonderes Anliegen war den Landwirten die Selbstbestimmung über angelegte Landschaftselemente allgemein. Ein Testlandwirt war zudem bereit, für Maßnahmen generell einen etwas geringeren Deckungsbeitrag zu erzielen, wenn damit ein Werbeeffekt für ihn verbunden sei.

Auf Basis dieser ersten Erkenntnisse wurde im Zuge eines PC-gestützten Discrete Choice Experiments eine weitere Befragung mit sieben anderen Landwirten zu Kapazitäten und zur Bereitschaft der Maßnahmenumsetzung durchgeführt. Ein wichtiges Ergebnis hierbei war, dass alle Landwirte zur Gestaltung einer diverseren Fruchtartenvielfalt bereit sind, als sie bisher in den drei Testbetrieben vorliegen. Blühstreifen sind eine weit akzeptierte Maßnahme, allerdings sollte ihr Umfang nach Ansicht der befragten Landwirte mehr oder weniger stark begrenzt sein. Als Hauptmotiv für diese Maßnahmen wurde die Akzeptanz durch die Bevölkerung genannt. Wie beide Befragungen zeigen, sind Maßnahmen mit hoher naturschutzfachlicher Bedeutung aber mit geringerer Öffentlichkeitswirksamkeit wie Ackerrandstreifen somit vergleichsweise weniger gefragt. Weitere Ergebnisse zum Thema Akzeptanz von Blühstreifen sind in den Kapiteln 3.5 und 3.6 nachzulesen.

2.1.6 Welche Instrumente können zur Bewertung eines nachhaltigen Biomasseanbaus herangezogen werden?

Marianne Karpenstein-Machan, Christina von Haaren, Roland Bauböck, Michael Rode, Wiebke Saathoff

Zielgruppen: Landwirte, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager

2.1.6.1 Biomasseertragsmodell BioSTAR

Für die Modellierung der Biomasseerträge in den drei Modelllandkreisen wurde das Biomasseertragsmodell BioSTAR (Biomass Simulation Tool for Agricultural Resources; Bauböck 2013) verwendet. Mit diesem Pflanzenmodell lassen sich sowohl großräumige (auf den Landkreis bezogene) oder auch kleinräumige auf den Schlag bezogene Biomassepotenziale für Ackerkulturen ermitteln. So können z. B. auch neue Kulturarten, wie die durchwachsene Silphie, Sorghumarten oder Sonnenblumen berechnet werden, die z.Zt. noch selten angebaut werden und über deren Erträge kaum standortspezifische Informationen vorliegen.

Bei dem Modell BioSTAR handelt es sich um ein kohlenstoffbasiertes Pflanzenmodell, mit dem anhand von Eingangsklimadaten (Niederschlagshöhe, Temperatur, Globalstrahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit) sowie dem verfügbaren Bodenwasser (Feldkapazität) und Veränderung des Blattflächenindexes in der Vegetationszeit der Kulturen der Ertragszuwachs im Verlauf der Vegetationsperiode simuliert wird (s. Kap. 3.4).

2.1.6.2 Lineares Programmierungsmodell zur Berechnung des Gesamtdeckungsbeitrages (LP)

Mit Hilfe des linearen Programmierungsmodells können mögliche Kulturarten in ihren Anbauumfängen und Fruchtfolgen so bestimmt werden, dass ein maximaler Gesamtdeckungsbeitrag erzielt wird. Für die Optimierung der Fruchtfolge wird auf eine Vor-Nachfrucht-Kombinationsmatrix zurückgegriffen (Karpenstein-Machan et al. 2013), die den Vorfruchteffekt auf die nachfolgende Frucht bewertet. Die empirisch ermittelten Zu- und Abschläge für positive und negative Fruchtfolgeeffekte aus der Vorfrucht-Nachfrucht-Kombinationsmatrix bilden den Ausgangspunkt für die Gesamtdeckungsbeitragsberechnung in dem LP-Modell. Die Optimierung erfolgt auf der Basis einer ausgeglichenen Humusbilanz.

Zusätzliche Komponenten, die in der Optimierung berücksichtigt werden, sind: Flächenverfügbarkeit, Arbeitskraftkapazitäten, Umfänge von verpflichtenden Lieferkontingenten, Anbaurestriktionen in Form von minimalen und maximalen Anbauumfängen einzelner Kulturarten und Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Sondermaßnahmen und -kulturen (z.B. Blühstreifenmindestanteil im Mais).

Die gegenwärtigen Anbauprogramme (Status quo) der Modellbetriebe, die Nahrungs-, Futter- und Energiepflanzen anbauen, werden optimierten Varianten gegenübergestellt. Die ökonomische Optimierung wird einer pflanzenbaulichen und einer naturschutzfachlichen Optimierung gegenübergestellt. (s. Kap. 3.5).

2.1.6.3 Umweltmanagementsoftware MANUELA

MANUELA ist eine GiS-gestützte Open Source Software, mit der die naturschutzfachlichen Potenziale und Leistungen eines landwirtschaftlichen Betriebes bewertet werden können. Es wurden Werkzeuge entwickelt, die der Bewertung der CO_2-Emissionen von landwirtschaftlich genutzten Niedermooren und Grünlandumbruch sowie der Bewertung der N_2O-Emissionen aus der Stickstoffdüngung unterschiedlicher Energiekulturen dienen. Im Hinblick auf den Artenschutz wurde ein Werkzeug implementiert, welches die Auswirkungen der Flächennutzung (z. B. Fruchtartendiversität, Ackerrandstreifen) auf die Lebensraumqualität von Flora und Fauna bewertet. Werkzeuge zur Bewertung von Feldhecken für den örtlichen Biotopverbund kamen außerdem zur Anwendung. Als wichtiges Entscheidungskriterium für eine eventuelle Maßnahmenumsetzung können mit MANUELA ebenfalls Kosten bestimmter Maßnahmen, wie z.B. die Gehölzpflanzung, errechnet werden. Kosten einer erweiterten Fruchtartendiversität (Artenschutzmaßnahme) sollen zukünftig über eine angepasste, operationalisierte Version der linearen Programmierung berechnet werden können (s. Kap. 3.4).

Literatur (für Kap. 2.1.3 - 2.1.6)

Bauböck, R. (2013). *GIS-gestützte Modellierung und Analyse von Agrar-Biomassepotenzialen in Niedersachsen. Einführung in das Pflanzenmodell BioSTAR*. Dissertation Universität Göttingen.

Eggelsmann, R., Bartels, R. (1975). Oxidativer Torfverzehr im Niedermoor in Abhängigkeit von Entwässerung, Nutzung und Düngung. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft 22*, 215-221.

Karpenstein-Machan, M., Zimmermann, T., Musshoff, O. (2013). Ökonomische und pflanzenbauliche Optimierung des Anbaus von Nahrungs-, Futter- und Energiepflanzen mit Unterstützung eines Linearen Programmierungsmodells. *Berichte über Landwirtschaft 91*, Heft 1, S. 1 -16.

2.1.7 Wie kann Bioenergie auf lokaler Ebene wirtschaftlich genutzt werden, ohne dabei soziale Belange zu missachten?

Anke Daub, Folker Roland

Zielgruppen: Landwirte, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Anlagenbetreiber, Energieversorgungsunternehmen, Energiegenossenschaften

Zu beantworten ist in diesem Abschnitt die Frage einer wirtschaftlichen Nutzung von Biomasse mit Blick auf ihren Einsatz in Biogasanlagen zur Stromproduktion und zur Nutzung der entstehenden Wärme in einem Nahwärmenetz.[8] Dabei liegt der Fokus hier auf einer lokalen Planung, deren Ergebnisse aber dann in die Planung regionaler Versorgungsstrukturen einfließen können.[9]

Als zentrale Kennzahl zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionsvorhaben, wie es die Planung und Realisierung eines Nahwärmenetzes darstellt, bei der von einer vergleichsweise langen Nutzungsdauer (in der Regel mehr als zwanzig Jahre) auszugehen ist, dient der Kapitalwert.[10] Er gibt Auskunft darüber, ob und in welchem Ausmaß eine Investition in Sachgüter (hier das Nahwärmenetz und die Biogasanlage) wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer Anlage der entsprechenden finanziellen Mittel auf dem Kapitalmarkt hat. Dazu werden alle Ein- und Auszahlungen, die mit dem Bau und Betrieb der Biogasanlage und des Nahwärmenetzes verbunden sind, mit ihrem Wert zum Anfangszeitpunkt des Projektes (durch Abzinsen mit dem so genannten Kalkulationszinssatz) angesetzt und saldiert. Ergibt sich aus der Berechnung ein positiver Wert, so kann die Investition als wirtschaftlich vorteilhaft eingestuft werden, andernfalls ist sie – zumindest bei ausschließlich ökonomischer Bewertung – in Frage zu stellen. Erfasst werden in diesem Zusammenhang sowohl Auszahlungen z. B. an Landwirte (für die erforderliche Biomasse) oder an Unternehmen (für den Bau der Anlage und des Nahwärmenetzes) als auch Einzahlungen für die Stromeinspeisung, den Wärmeverkauf oder auch Zuschüsse von öffentlichen Haushalten.

Um eine Entscheidung für den Aufbau einer Wärmeversorgung auf der Basis von Biomasse z. B. in einem Dorf fundiert zu treffen, kann in mehrfacher Hinsicht auf Planungsinstrumente zurückgegriffen werden: Im Zusammenhang beispielsweise mit einem zu verlegenden Nahwärmenetz lassen sich bei der Planung des Verlaufs der Wärmeleitungen Modelle einsetzen, die einerseits Hinweise auf die kostengünstigste Lösung geben und andererseits darauf, welche Haushalte vielleicht nur unter Inkaufnahme wirtschaftlicher Nachteile (im Vergleich zur Opti-

[8] Die Ausführungen beziehen sich nicht auf die Nutzung fester Biomasse zur ausschließlichen Wärmeproduktion (z.B. Scheitholz, Holzhackschnitzel, Pellets).

[9] Vgl. zur Gestaltung eines regionalen Wärmeversorgungssystems auf der Basis von Biomasse die Ausführungen in Kapitel 2.2.4, 3.2 und 3.9.

[10] Vgl. zum Begriff und zur Bedeutung des Kapitalwertes (Lücke 1991) sowie (Götze 2014).

mallösung) angeschlossen werden können. Hier sollten dann Abwägungen unter Berücksichtigung sozialer Aspekte (z. B. kein Ausschluss einzelner Dorfbewohner, Einbeziehung von Altenheimen oder Sportstätten) erfolgen und in die Entscheidung integriert werden. Außerdem können auf der Basis eines Vorschlags zum Netzverlauf (und zur Dimensionierung der Biogasanlage) Überlegungen dazu angestellt werden, welchen Einfluss Veränderungen des Biomassepreises (in beide Richtungen) auf die Wirtschaftlichkeit des Wärmeversorgungssystems haben.

Die Benutzung eines solchen Planungsinstruments hat gegenüber den bisherigen Machbarkeitsstudien der Ingenieure zwei Vorteile:

1. Auf der einen Seite wird auf der Basis der gegebenen Daten (Wärmekunden, Wärmebedarfe, Verlegekosten etc.) dasjenige Nahwärmenetz identifiziert, das den höchsten Kapitalwert aufweist. So kann der Betreiber in Kenntnis der vorteilhaftesten Alternative eine Entscheidung treffen.
2. Mit Blick auf die häufig auftretenden Änderungen der Informationsgrundlage in der Planungsphase (z. B. neue Wärmekunden oder Kündigung von bestehenden Wärmevorverträgen, zusätzliche Erkenntnisse aus Ortsbegehungen, Veränderung beim Biomasseangebot) bietet das Planungsmodell auf der anderen Seite den Vorteil, flexibel, zeitnah und ohne großen Aufwand diese neuen Informationen in den Planungsprozess einzubinden und ihre Auswirkungen zu analysieren. Derartige (kurzfristige) Neuplanungen in größerem Umfang sind mit den bestehenden Instrumenten, die in Ingenieurbüros in der Regel zum Einsatz kommen, entweder häufig nicht möglich oder liefern für die neuen Rahmenbedingungen nicht unbedingt die wirtschaftlich vorteilhafteste Lösung.

Grundsätzlich lassen sich verschiedene Faktoren identifizieren, die positiv mit der Wirtschaftlichkeit eines solchen Wärmedistributionssystems korrelieren. So fördern eine hohe Anschlussdichte[11] sowie die Existenz von Wärmeabnehmern, die auch im Sommer und/oder in der Übergangszeit Wärme nachfragen (z. B. Freibäder, Gärtnereien, Gewerbebetriebe mit Prozesswärmebedarf) die Vorteilhaftigkeit in besonderem Maße. Ebenfalls positiv einzustufen sind günstige Verlegekosten für das Nahwärmenetz oder die Tatsache, dass keine konkurrierenden leitungsgebundenen Wärmeangebote bestehen.

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems hat ebenfalls die Frage des Standorts der Biogasanlage Relevanz, insbesondere wenn die *Beschaffung* der Substrate für die Biogasproduktion betrachtet wird. In dem entwickelten Modell wird daher sowohl die Verfügbarkeit von Wirtschaftsdünger als auch von nachwachsenden Rohstoffen betrachtet. Unter Berücksichtigung der anfallenden Beschaffungs- und Transportkosten sowie der unterschiedlichen Vergütungssätze des EEG und weiterer relevanter Parameter wird eine simultane Standort- und Netzwerkoptimierung durchgeführt, bei der der Kapitalwert als Zielfunktionsgröße

[11] Im Hinblick auf diesen Aspekt kommt der Akzeptanz des Einsatzes von Bioenergie zur Wärmeversorgung und einer aktiven Beteiligung der Bevölkerung eine große Bedeutung zu.

maximiert wird. Aus ökonomischer Sicht lassen sich dadurch die Einflussfaktoren der Beschaffungsseite auf den Kapitalwert besser einschätzen und bewerten.

Die *Biomasseproduktion* an sich stellt ein eigenes Planungsfeld dar. Dabei können beispielsweise mit Methoden der Linearen Programmierung unter Berücksichtigung landwirtschaftlicher und naturschutzbezogener Vorgaben ökonomisch sinnvolle, umweltverträgliche und akzeptierte Fruchtfolgen identifiziert werden.

Eine auf Biomasse basierende Wärmeversorgung hat in der Bevölkerung vor allem dann eine Chance auf Umsetzung, wenn sie ökonomisch (auch im Vergleich zum Einsatz fossiler Energieträger) vorteilhaft ist. Diese Wirtschaftlichkeit kann in einem Modell zur Entscheidungsunterstützung anhand des Kapitalwertes beurteilt werden. In ein solches Modell fließen soziale und ökologische Belange als Nebenbedingungen ein, die nicht verletzt werden dürfen. Dies schließt eine Missachtung dieser ökologischen und sozialen Vorgaben aus, auch wenn sie die Höhe des Kapitalwertes negativ beeinflussen.

Literatur

Götze, U. (2014). *Investitionsrechnung*. 7. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer.

Lücke, W. (Hrsg.) (1991). *Investitionslexikon*. 2. Aufl., München: Vahlen.

2.1.8 Welche Instrumente bestehen, um Konflikte zwischen der energetischen Biomassenutzung und anderen Raumnutzungen (Natur- und Landschaftsschutz, Erholung) zu erkennen? Wie lässt sich ein Konfliktmanagement effektiv und auf die lokalen Bedürfnisse angepasst gestalten?

Wiebke Saathoff, Christina von Haaren, Roland Bauböck, Michael Rode, Karol Granoszewski

Zielgruppen: Landwirte, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager, Regionalmanager, Bürgermeister

2.1.8.1 Instrumente zur frühzeitigen Erkennung von Nutzungskonflikten

Ein methodisches Instrument, um mögliche Nutzungskonflikte zwischen den unterschiedlichen Raumnutzungen zu erkennen, ist die Ökologische Risikoanalyse. Sie ermöglicht es, die Wirkungen von Nutzungen auf Funktionen und Werte des Naturhaushaltes und der Biodiversität abzuschätzen (z.B. Grundwasserdargebotsfunktion, Biotopfunktion etc.) und damit Konflikte zwischen unterschiedlichen Ansprüchen an den Raum zu verdeutlichen. Ob eine Landschaftsfunktion durch den Energiepflanzenanbau beeinträchtigt wird, kann nur mit einem konkreten Raumbezug überprüft werden, da die Beeinträchtigung nicht nur von dem Wirkfaktor (z.B. kulturartenspezifische Bestandsstruktur und -entwicklung) sondern auch von der Empfindlichkeit des Standortes abhängt. Im Falle einer möglichen Beeinträchtigung der Biotopfunktion ist zudem die Größe des untersuchten Raumes relevant. Hier ist aufgrund weiträumigerer Wanderbewegungen vieler Tierarten eine Untersuchung auf Landschaftsebene erforderlich (s. Kap. 3.5).

Die auf den drei Testbetrieben (vgl. Schlüsselfrage 2.1.3; Kap. 3.5) eingesetzte naturschutzfachliche Betriebsmanagementsoftware MANUELA baut in ihren Tools u.a. auf dem Prinzip der Ökologischen Risikoanalyse auf. Zum Beispiel kann der Landwirt im Falle des Biotopentwicklungspotenzials die Empfindlichkeit bzw. das Potenzial seiner Schläge gegenüber der Entwicklung einer mehr oder weniger spezialisierten schutzwürdigen Vegetation bei extensivierter Nutzung prüfen. Der Nutzen für den Landwirt besteht darin, dass er erkennen kann, ob sich die Naturschutznutzung einer nicht rentabel bewirtschaftbaren Fläche lohnt und er dort Argarumweltmaßnahmen beantragen oder die Fläche für Kompensationszwecke bereitstellen sollte. Sollte ein Landwirt planen, einen Grünlandstandort umzubrechen, um dort Energiepflanzen zu produzieren, kann er anhand des Klimaschutz-Tools des Programms die bodentypspezifische Empfindlichkeit von Grünlandstandorten gegenüber CO_2-Emissionen im Falle einer Landnutzungsänderung überprüfen. Das Instrument ist aber ebenso dafür nutzbar, die Klimaschutzleistung im Falle des Grünlanderhalts zu überprüfen und zu kommunizieren. Die Überprü-

fung möglicher Beeinträchtigungen der Naturgüter durch unterschiedliche Wirkfaktoren des Energiepflanzenanbaus kann für Akteure, die eine Biogasanlage planen, eine gute Basis zur frühzeitigen Abschätzung und zur Vermeidung von etwaigen Wirkungen auf die Landschaft sein. Damit können Landwirte ihre Planungen kommunizieren und zeigen, wie sie durch mögliche betriebliche Maßnahmen (s.u.) Auswirkungen mildern oder kompensieren.

Zusätzlich muss jedoch eine Betrachtung auf Landschafts- bzw. regionaler Ebene erfolgen, die nicht auf Betriebsebene durchgeführt werden kann. Unter anderem können auf der regionalen Ebene kumulative Wirkungen weiterer Energiepflanzenanbauer und anderer Raumnutzer auf eine Landschaftsfunktion identifiziert und die überlokalen Werte und räumlichen Strukturen der Schutzgüter einbezogen werden (vgl. Kap. 2.2.2 und 3.5). Die Analysen am Beispiel der Biodiversität und der Klimaschutzfunktion auf regionaler Ebene haben gezeigt, dass es möglich ist, den regionalen Entscheidungsprozess (z.B. mit dem Simulationsmodell 100PROSIM; Schmidt-Kanefendt 2017) auf diese Weise zu unterstützen.

Zur Modellierung der zukünftigen Nutzungsentwicklung und der Konsequenzen wahrscheinlicher Steigerungen oder Verminderungen des Energiepflanzenanbaus auf die Energieplanungen einer Region eignet sich auch das Modell CLUE, das in Kopplung mit dem bereits oben erwähnten Simulationsmodell 100PROSIM erprobt wurde (vgl. Kap. 2.1.8, 2.2.1, 3.5).

Für die überbetriebliche und regionale Steuerung einer Fachplanung im Bereich des Energiepflanzenanbaus kann das Biomassepotenzialmodell BioSTAR einen Beitrag leisten. Mit BioSTAR lassen sich regionale und überregionale Biomassepotenziale unterschiedlicher Anbauszenarien (Kulturen, Fruchtfolgen, Anteile von Nahrungsmittel- und Energiepflanzenproduktion) simulieren (siehe Kap. 3.4). Über Ausschlusskriterien und Planungsvorgaben kann dann eine Verfeinerung vorgenommen werden. Die Ergebnisse aus so einem „Top-down"-Ansatz können im Bereich der Fachplanungen weiterverwendet werden. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass regionale Zusammenhänge, Grenzen und Belange in einer Agrarlandschaft erkannt und somit besser berücksichtigt werden können.

2.1.8.2 Lösung von Nutzungskonflikten zwischen Energiepflanzenanbau und Natur- und Landschaftsschutz

Nutzungskonflikte zwischen Naturschutz und Energiepflanzenanbau können durch Maßnahmen auf der Anbaufläche und durch räumliche Steuerung der Anlagen sowie des Anbaus gelöst oder vermindert werden.

Eine mögliche Folge des Energiepflanzenanbaus sind eine verengte Fruchtartendiversität, -folge sowie eine monokulturartige Fruchtartenverteilung auf der Betriebs- und Landschaftsebene. Dies hat u.a. negative Auswirkungen auf die Lebensraumvielfalt von Arten und das Landschaftsbild. Der monokulturartige Anbau pro Schlag wirkt sich zudem negativ auf die Ertragsfähigkeit der Böden aus. Durch die Integration weiterer Fruchtarten sowie die Absprache über die Fruchtarten-

verteilung mit Bewirtschaftern benachbarter Flächen (Anbau gleicher Kulturen auf benachbarten Schlägen vermeiden, s. Kap. 2.1.4 und 3.5) können gleichzeitig positive Effekte für Landschaftsbild, Artenschutz, Bodenfruchtbarkeit, ggf. Wasserschutz etc. erzielt werden. Auf diese Weise könnte der Konflikt zwischen Energiepflanzenanbau, Erholung und Naturschutz verringert werden. Auch die Anlage von Randstreifen (Mindestbreite: 6 m, s. Kap. 3.5) kann hierzu durch die Aufwertung des Landschaftsbildes sowie zur Schaffung vielfältiger Habitatstrukturen beitragen. Die Vermeidung überhöhter Stickstoffeinträge im Zuge des Düngemanagements vermag sich je nach Empfindlichkeit des Standortes vorteilhaft auf das Grundwasserdargebot, auf die Artenvielfalt und durch die Vermeidung von N_2O-Emissionen (s. Kap. 3.5) auf den Klimaschutz auszuwirken. Eine Synergie dieser Maßnahme mit dem Energiepflanzenanbau kann in der Einsparung teurer Mineraldünger bestehen.

Durch den Einsatz von MANUELA (z.B. durch einen landwirtschaftlichen Berater) kann der Landwirt die Auswirkungen seines Betriebsmanagements auf Natur und Landschaft überprüfen. Über das Bewertungssystem wird ihm mitgeteilt, welche Bewirtschaftung am optimalsten für das jeweilige Schutzgut ist. Er kann, auch auf Basis des Kostentools, dann selbst entscheiden, ob der Landwirt diese Anpassungsmaßnahmen umsetzen möchte oder nicht. Die Ergebniskarten von MANUELA müssen jedoch nicht nur zur eigenen Überprüfung dienen, sie können auch für Werbezwecke verwendet werden oder als Beleg für die Einhaltung bestimmter Vertragsverpflichungen, bspsw. in Zertifizierungsprogrammen für „grünen Strom".

2.1.8.3 Problematik des Energiemaisanbaus

Silomais hat sich in den letzten Jahren als die Haupt-Energiepflanze (Vergärung) etabliert. Hohe Flächen- und Methanerträge sowie die (relativ gesehen) geringen Ansprüche an Boden und Wasserverfügbarkeit spielten hierbei eine wichtige Rolle. Aufgrund von ökologischen und sozialen Problematiken, die im Zusammenhang mit dem Energiemaisanbau vermehrt diskutiert werden (Stichwort „Vermaisung"), wird sowohl von Seite der Forschung und der Züchtung, als auch von der Seite der Landwirte nach alternativen Energiepflanzen gesucht. Betrachtet man die Palette der in Frage kommenden Energiepflanzen, so kann durchaus von einer Vielfalt gesprochen werden. Da der Silomais (als Futterpflanze) über viele Züchtungsjahre gut an unsere Klimaverhältnisse angepasst werden konnte und viele Landwirte sich gut mit dieser Kultur auskennen und demzufolge auch nur geringe Risiken (Ertragseinbußen) bei deren Anbau eingehen, finden alternative Energiepflanzen bisher nur in geringem Umfang Eingang in die Fruchtfolgen der Landwirte.

Genau an dieser Stelle kann ein Pflanzenmodell wie BioSTAR, welches insbesondere für den Einsatz als Biomassesimulationswerkzeug für Agrarpflanzen entwickelt worden ist, einen nützlichen Beitrag leisten (siehe Kap. 3.4). BioSTAR wurde vor allem für die Ermittlung von schlagbezogenen und großräumigen Bio-

massepotenzialen entwickelt und ist bereits für diverse Energie- und Nahrungsmittelkulturen mit Realdaten getestet und validiert worden (Bauböck 2013).

Mit Hilfe von BioSTAR lassen sich standortbezogene, also boden- und klimaabhängige Biomasseerträge sowohl für den Energiemais als auch für diverse Alternativkulturen (Ganzpflanzensilage – GPS -, Sorghum, Sonnenblume, Silphie, Zuckerrübe, Pappel und Weiden) berechnen. Insbesondere GPS, wie Roggen oder Triticale kann dem Mais hinsichtlich des Ertragsniveaus in den kühleren Mittelgebirgslagen oder in trockeneren Jahren durchaus überlegen sein (siehe Kap. 3.4). Dauerkulturen wie die durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*) oder schnellwachsende Gehölze wie Pappeln und Weiden können im Vergleich zum Maisanbau durch eine bessere Gesamtökobilanz punkten. In diesem Zusammenhang zu nennen sind z.B. eine bessere Humusbilanz dieser Kulturen, ein verringerter Pflanzenschutzmittel- und Düngereinsatz sowie weniger Flächenbefahrungen (siehe Kap. 3.3). Für eine Verbesserung des Landschaftsbildes der heimischen Kulturlandschaft können ein vermehrter Anbau von Getreide-GPS oder die Anlage von Randstreifen aus Sonnenblumen um Maisfelder einen positiven Beitrag leisten. Um Änderungen in der Fruchtfolge und im Anbauspektrum hinsichtlich des Ertragsniveaus besser einschätzen und planen zu können, kann das Modell BioSTAR als Entscheidungshilfetool herangezogen werden.

2.1.8.4 Sozio-ökonomische Konflikte beim Energiepflanzenanbau

Die Energieerzeugung in Form von Biogas, die im Wesentlichen auf den Anbau von Energiepflanzen angewiesen ist, hat nicht nur ökologische Folgen, wie z. B. den Verlust an Biodiversität durch Monokulturen, sondern darüber hinaus auch sozio-ökonomische Auswirkungen auf die Landwirtschaft. So besteht eine hohe Konkurrenz der Biogaserzeugung mit der Nahrungsmittelerzeugung infolge attraktiver Vergütungen durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz. Entsprechend hoch ist das Spannungsfeld zwischen beiden Nutzungsrichtungen. Ist diese Nutzungskonkurrenz stark ausgeprägt, besteht die Gefahr zunehmender Konflikte, die zu einem Akzeptanzbruch der Landwirte gegenüber der Bioenergie führen können.

Landwirte, die einen hohen Konkurrenzdruck wahrnehmen, werden in ihrem unternehmerischen Verhalten negativ beeinflusst und sind aus Gründen der Konfliktprävention und dem Wunsch, sozialen Normen zu entsprechen, nicht bereit, am Biogasbereich zu partizipieren. Mit zunehmender Anlagendichte in der Region steigt diese Gefahr eines Akzeptanzbruchs. Verfolgen Kommunen ambitionierte Ausbaupläne im Bereich der Biogaserzeugung, so sollte die landwirtschaftliche Unterstützung sichergestellt werden. Hierbei ist die direkte Ressourcenkonkurrenz durch normativ-regulative Ansätze zu reduzieren. Eine stärkere Förderung des Einsatzes von landwirtschaftlichen Reststoffen wie z.B. Wirtschaftsdünger könnte hierzu beitragen und sollte nicht nur von der nationalen Politik im Zuge des EEG bevorzugt vergütet, sondern auch lokal gefördert werden. Ferner bestehen in der Bundesrepublik beachtliche Flächen, die für die Lebensmittelproduktion auf

Grund erhöhter Belastungen ungeeignet sind. Die Nutzung solcher kontaminierter Standorte könnte die Flächenkonkurrenz reduzieren (siehe Kap. 3.10). Des Weiteren erfolgt der Zubau von Biogasanlagen vielfach räumlich konzentriert. Ergebnis sind verstärkte Nutzungskonkurrenzen in solchen Kommunen. Bei der Raumordungsplanung sollten solche Agglomerationseffekte vermieden werden. Lokale Entscheidungsträger aus Politik und Wirtschaft können jedoch nicht allein auf regulative Maßnahmen setzen. Denn innerlandwirtschaftliche Diskussionen über die Folgen der Biogaserzeugung werden größtenteils emotional geführt und lösen sich deshalb nicht alleine aus rationaler Ressourcensicht. So wird z.B. der Anstieg der Pachtpreise deutlich stärker empfunden als es Statistiken ausweisen. Demzufolge sind Strategien zur Steigerung der Akzeptanz von Biogaskritikern zu verfolgen. Da Landwirte stabile soziale Netzwerke mit ihren Berufskollegen schätzen, könnte die soziale Einbettung als Unterstützung für den Ausbau der Energieerzeugung aus Biomasse genutzt werden. Regelmäßige Möglichkeiten zum Austausch von Landwirten im Rahmen von z.B. landwirtschaftlichen Entwicklungsworkshops sollten eingerichtet werden, um den Diskurs über die Vor- und Nachteile von Bioenergie zu fördern und einen Konsens zu finden. Neben dem grundsätzlichen Bedürfnis von Landwirten nach einem sozialen „Frieden" könnten Kooperationen zwischen Landwirten helfen, die regionale Akzeptanz gegenüber Bioenergie im Berufsstand zu erhöhen. Vielfach besteht erhebliches noch nicht ausgeschöpftes Kooperationspotenzial. Aus Akzeptanzsicht könnte eine breite Partizipation von Landwirten am Bau und der Betreibung einer Gemeinschaftsanlage die lokale landwirtschaftliche Unterstützung durch die motivationale, organisatorische und finanzielle Einbindung steigern. Die Förderung von Genossenschaften durch z.B. gezielte finanzielle Förderprogramme und die Kommunikation von Vorteilen wie z.B. des lokalen Wertschöpfungskreislaufes könnten helfen, die Unterstützung der Bioenergie im bäurischen Berufsstand und im Falle der Beteiligung von Bürgern in der Gesellschaft zu erhöhen.

Akzeptanzbildende Strategien zur Konfliktvermeidung oder Konfliktschlichtung bei bereits aufgetretenen Auseinandersetzungen sollten von neutraler Seite aus initiiert werden. Da Landwirte dem eigenen Berufsstand ein höheres Vertrauen entgegenbringen, sollte die landwirtschaftliche Offizialberatung diesen Aufgabenbereich ausweiten – auch um frühzeitig Konflikte zu erkennen.

Ohne hinreichende Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Unterstützung zur Bioenergieerzeugung im Rahmen von Biomassepotenzialstudien ist vielfach mit Problemen bei der Standortsuche für Anlagen und deren Rohstoffbeschaffung zu rechnen. Insofern bietet es sich für lokale Verwaltung und Politik an, das landwirtschaftliche Unterstützungspotenzial frühzeitig z.B. durch Unternehmerbefragungen zu erfassen, um das mögliche Biomasseaufkommen präziser abzuschätzen und gegebenenfalls auch, um innerlandwirtschaftliche und soziale Restriktionen zu verkleinern (siehe Kap. 3.6 und 3.7).

Literatur

Bauböck, R. (2013). *GIS-gestützte Modellierung und Analyse von Agrar-Biomassepotenzialen in Niedersachsen – Einführung in das Pflanzenmodell BioSTAR. Dissertation Universität Göttingen.* 177 S., gesichtet am 28.6.2017: https://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/00-1735-0000-000E-0ABB-9

Schmidt-Kahnefendt, H.-H. (2017). *Zielperspektiven entwickeln für 100%-Erneuerbare-Energien-Regionen.* Gesichtet am 30.4.2017: http://www.wattweg.net

2.1.9 Wie können kontaminierte Standorte für die energetische Nutzung von Biomasse herangezogen werden? Welche Kulturen nehmen nur geringe Mengen an Schadstoffen aus dem Boden auf?

Benedikt Sauer, Wiebke Fahlbusch, Hans Ruppert

Zielgruppen: Landwirte, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager, Anlagenbetreiber

In Deutschland sind potenziell bis zu etwa 10% der landwirtschaftlichen Fläche mit Schadelementen belastet, so dass dort eine uneingeschränkte Lebens- und Futtermittelproduktion nicht möglich ist. Solche Bereiche sind die Auenbereiche großer Flüsse wie Rhein, Neckar, Main, Weser, Elbe und teilweise auch kleinerer Flüsse wie z.B. Oker und Innerste (Niedersachsen), aber auch Rieselfelder, Industrieflächen oder Schwermetallindustriestandorte. Häufig sind diese Flächen mit mehreren Schadelementen wie z. B. Arsen, Cadmium, Blei, Kupfer, Antimon, Wismut, Thallium und Zink belastet. Konventionelle Technologien zum Sanieren dieser zum Teil ausgedehnten Bereiche sind weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll und durchführbar. Die Schadelemente durch den gezielten Anbau mit schwermetallakkumulierenden Pflanzen zu reinigen, die sogenannte Phytoremediation, ist nicht zielführend, da es Jahrhunderte bis Jahrtausende dauert, den Gehalt in einem Boden auf akzeptable niedrige Gehalte zu senken (s. Kap. 3.10).

Eine echte Alternative hierzu ist, auf belasteten Flächen Pflanzen mit hohen Biomasseerträgen und gleichzeitiger geringer Schadelementaufnahme anzubauen. Diese Pflanzen werden siliert und dann als Substrat in Biogasanlagen gegeben und können somit zur erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion beitragen. Bei diesem Nutzungspfad ist die Gefahr des Eintritts der toxischen Metalle in die Futtermittel- bzw. Lebensmittelkreisläufe gebannt. Durch die anzustrebende ganzjährige Bedeckung des Bodens mit Energiepflanzen wird eine partikuläre Verlagerung der Schadelemente in andere Bereiche oder in die Gewässer minimiert. Die Gärreste mit ihren Nährelementen werden als Wirtschaftsdünger wieder auf die Felder zurückgeführt, auf denen die Energiepflanzen erzeugt wurden. Hierbei muss beachtet werden, dass sich die Nähr- und Schadelemente im Gärrest ungefähr um den Faktor 3 gegenüber den Pflanzen anreichern (Sauer 2009; Sauer & Ruppert 2013). Da der Grenzwert für Cadmium in Düngemitteln nach der Düngemittelverordnung bei 1,5 mg/kg liegt, dürfen somit im Schnitt nur Energiepflanzen mit Cadmiumgehalten unter 0,5 mg/kg TS eingesetzt werden.

Die Aufnahme von Schadelementen durch unterschiedliche Pflanzen wurde an zehn Standorten mit stark variierender Belastung getestet (s. Kap. 3.10). Grundsätzlich verhalten sich die Elemente entsprechend ihrer chemischen Eigenschaften im System Boden-Pflanze unterschiedlich. Einige, wie Cadmium, Thallium und Zink sind relativ mobil. Selbst bei geringen Gehalten im Boden können sich diese

Elemente in den oberirdischen Pflanzenteilen anreichern. Elemente wie Kupfer, Molybdän und Nickel sind in geringerem Maße mobil. Kaum aufgenommen werden beispielsweise Blei, Chrom(III) oder Titan. Bei dieser Gruppe erfolgt die Kontamination hauptsächlich durch anhaftendes Bodenmaterial auf Blatt- oder Stieloberflächen, welches den Elementgesamtgehalt stark verfälschen kann.

Die verschiedenen Pflanzenfamilien, -gattungen und -arten reichern Schadelemente sehr unterschiedlich an. Auf dem gleichen Standort kann sich der Cadmiumgehalt in unterschiedlichen Pflanzen teilweise um den Faktor 100 unterscheiden (0,1 mg/kg Cd in Durchwachsener Silphie zu 9,1 mg/kg Cd in Amarant). Diese Tatsache zeigt, dass neben der Bodenkontamination auch die Pflanzenphysiologie einen sehr hohen Einfluss auf die Schwermetallaufnahme hat. Von den getesteten Kulturarten wurden vor allem Gattungen und Arten der Süßgräser als Pflanzen mit geringem Aufnahmepotenzial identifiziert. Dazu gehören zum Beispiel verschiedene Getreidearten wie Roggen, Weizen, Gerste, Triticale oder auch Mais. Unter den Hauptgetreidearten konnte so auf allen Standorten des Projektes folgende Reihenfolge der Cadmiumanreicherung festgestellt werden: Roggen < Gerste < Weizen. Zum Beispiel enthält am Standort Ohrum (Cadmiumgehalt im Boden: 12,9 mg/kg, pH-Wert: 6,8) Roggen (5 Sorten) 0,43 mg/kg Cadmium, Gerste (3 Sorten) 0,56 mg/kg und Weizen (3 Sorten) 0,88 mg/kg. Sehr hohe Konzentrationen an Cadmium erreichen zum Beispiel einige Gattungen der Fuchsschwanzgewächse wie Amarant, Rübe (oberirdisches Blatt) und Quinoa. Einige Gattungen der Knöterichgewächse (z. B. Buchweizen, Igniscum) nehmen ebenfalls viel Cadmium auf und sind daher nicht als Energiepflanzen für kontaminierte Flächen zu empfehlen. Die Trends der Anreicherung in den verschiedenen Pflanzenarten ähneln sich auf den verschiedenen Standorten.

Neben den Pflanzeneigenschaften ist die Bindung bzw. Mobilität der Elemente im Boden ein weiteres Schlüsselkriterium für die Elementaufnahme. So können in besonderen Fällen auch geringe Gesamtgehalte im Boden besonders mobil sein. Am Standort Schwülper beispielsweise werden bei vergleichbaren Gehalten im Boden höhere Cadmiumgehalte in den Pflanzen erreicht als am Standort Heere. Dies hängt mit dem sehr niedrigen pH-Wert und dem porösen, sandigen Boden am Standort Schwülper zusammen.

Neben der Nutzung von Energiepflanzen für Biogas kann auch der Anbau von schnellwachsenden Hölzern in Kurzumtriebsplantagen (KUP) für schwermetallbelastete Flächen sinnvoll sein. Dies gilt insbesondere für sehr stark belastete oder abgelegene Flächen. In Deutschland sind zurzeit wenige Baumarten zur KUP-Nutzung zugelassen, darunter die ertragreichen Weiden und Pappeln sowie die weniger ertragsreichen Erlen und Robinien. Da Weiden sehr viel Cadmium aus dem Boden akkumulieren, welches teilweise bei der Verbrennung in die Luft gelangt (Kap. 3.11), sollte unbedingt auf die weniger akkumulierenden Robinien oder Erlen ausgewichen werden. Pappeln haben eine mittlere Cadmiumaufnahme.

Die Ergebnisse dieses Projektansatzes zeigen, dass es für kontaminierte Flächen Nutzungsalternativen in Form von Energiepflanzenanbau (z. B. in Form

einjähriger Pflanzen oder Kurzumtriebsplantagen) gibt und diese Standorte aus der Nahrungs- und Futtermittelproduktion herausgenommen werden sollten. Die Auswahl der Energiepflanzen erfolgt auf Basis der beiden Kriterien: maximaler Ertrag bei gleichzeitig niedriger Schadelementaufnahme.

Literatur

Sauer, B. (2009). Elementgehalte und Stoffströme bei der Strom- und Wärmegewinnung im Bioenergiedorf Jühnde. Schriftenreihe *Fortschritt neu denken* 2, 124.

Sauer, B. & Ruppert, H. Bioenergy Production as an Option for Polluted Soils – A Non-phytoremediation Approach. In: Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J. (Hrsg., 2013). *Sustainable Bioenergy Production – An Integrated Approach.* S. 427-446, Springer, Dordrecht.

2.1.10 Welche Auswirkungen hat die verstärkte Nutzung holziger Biomasse als Brennstoff? Wie können die Emissionen bei der Verbrennung verringert werden?

Torben Seidel, Jürgen Orasche, Tino Pasold, Hans Ruppert, Jürgen Schnelle-Kreis

Zielgruppen: Bürgermeister, landwirtschaftliche Berater, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager, Anlagenbetreiber

Die Verbrennung von Festbiomassen spart CO_2 bei der Wärmeerzeugung ein, führt aber umgekehrt zu Emissionen von Gasen, Stäuben, Elementen und organischen Verbindungen und hat einen erheblichen Flächenbedarf, wenn nicht Restbiomassen verwendet werden.

In Deutschland ist das Verbrennen von Festbrennstoffen wie Kohle und Holz zur Wärmeerzeugung u.a. in Kleinfeuerungsanlagen in Häusern mit etwa 14 Mio. Feuerstätten im Jahr 2005 weit verbreitet. Im Jahr 2007 betrugen die Feinstaubemissionen (PM_{10}; Partikel kleiner 10 µm Durchmesser) in Deutschland insgesamt 204.000t. Etwa 22.400 t (11 %) stammen dabei aus Kleinfeuerungsanlagen (Umweltbundesamt 2009). Davon entstanden 88 % durch die Verbrennung von Holz, der Rest durch das Verbrennen von Kohle und zu einem geringen Teil durch Öl und Gas. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Holz und halmartigen Brennstoffen ist ein weiterer Anstieg der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen zu beobachten (Umweltbundesamt 2015). In den Wintermonaten können Emissionen aus der Holzfeuerung bis zu 25 % der Feinstaubbelastung beitragen (Schwerpunkt in Süddeutschland und im Ruhrgebiet). Neuere Regelungen im Bundesimmissionsschutzgesetz in Kombination mit technischen Verbesserungen bei den Feuerungsanalagen sollten trotz wachsender Anlagenzahl eine Minderung der Feinstaubemissionen, von CO und NO_x bewirken.

Bei einer vollständigen optimalen Verbrennung von Pflanzen bestehen die Verbrennungsprodukte aus CO_2 und H_2O sowie aus löslichen anorganischen Komponenten, wie Chloriden, Sulfaten und Nitraten der Elemente Kalium und Calcium und Silikaten des Elementes Kalium, die im Wesentlichen gesundheitlich und ökologisch eher unbedenklich sind (Christensen et al. 1998; Ferge et al. 2005). In optimal ausgelegten Holzheizungen treten bei vollständiger Verbrennung nahezu nur anorganische salzartige Feinstaubemissionen auf, die erheblich weniger schädlich sind als die PAK-beladenen Rußpartikelemissionen aus Dieselmotoren, die mit PAKs (polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen) etc. beladen sind (Klippel & Nussbaumer 2007).

Läuft die Verbrennung von Biomasse jedoch nicht optimal ab, können sich im Abgas vermehrt Feinstäube bilden, welche neben den Elementen eine breite Palette an organischen Schadstoffen transportieren. Die Menge und Zusammensetzung des gebildeten organischen Materials der Feinstäube hängt ab von der Art der Ver-

brennungsvorrichtung, vom Luftüberschuss, der Temperatur in der primären Verbrennungszone, in der Reduktionszone und in der Nachbrennkammer, der Abgaszirkulation sowie von der Art und Güte des Brennstoffes (Korngröße, Rindenanteil, Zusammensetzung und Feuchtegehalt) (Andersson &. Marklund 1998; Oser et al. 2003; Ferge et al. 2005).

Die organischen Bestandteile der Emissionen haben vermutlich ein größeres toxikologisches Potenzial als die anorganischen Bestandteile. Während hierbei die PAKs über Stoffwechselmechanismen toxikologisch wirken (krebserregend), können ebenfalls gebildete sauerstoffreiche Verbindungen oxidativen Stress verursachen und direkt zu Entzündungen, beispielsweise in der Lunge, führen (Kap. 3.11). Des Weiteren ist der Anteil von Verbindungen höher, die direkt aus dem Abbau von Lignin- und Zellulose-Strukturen resultieren. Auch diese Verbindungen weisen einen hohen Anteil von Carbonyl- und Carboxyl-Gruppen auf, die aufgrund ihrer Reaktivität gesundheitlich relevant sein können aber kaum erforscht wurden. Bei unseren Untersuchungen zeigt sich, dass die Toxizitäts-Äquivalente (TEQ) für partikelgebundene PAK unter den ungünstigen Betriebsbedingungen in einem Kaminofen bis zu 8000-fach über den Werten einer automatisch beschickten, modernen Holzfeuerungsanlage liegen können.

Es wurde festgestellt, dass bei der Verbrennung holzartiger Brennstoffe umweltrelevante Elemente, wie Schwefel, Chrom, Cobalt, Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium, Zinn, Antimon, Thallium, Blei und Bismut teilweise im System verbleiben, wie z.B. im Material der Feuerraumauskleidung oder innerhalb der kühleren Zonen der Verbrennungsanlage und im Schornstein. An diesen Stellen konnten keine Proben genommen werden. Insbesondere bei einem untersuchten Kaminofen konnte nachgewiesen werden, dass das Auskleidungsmaterial große Mengen an aus dem Brennstoff freigesetzten Elementen aufnehmen kann und somit die Abluft reinigt. (Kap. 3.11)

In steigender Reihenfolge gelangen aus den biogenen Brennstoffen weniger als 1 % bis maximal 35 % der Schadelemente Thorium, Beryllium, Uran, Molybdän, Cobalt, Kupfer, Nickel, Schwefel, Chrom, Zinn, Antimon, Zink, Cadmium, Thallium, Blei und Wismut in die Umgebungsluft (steigende Reihenfolge der Durchschnittswerte aus 15 Brennversuchen).

Bedingt durch die Zunahme an organischem Material führt eine unvollständige Verbrennung zu einer Erhöhung der Gesamtstaubemissionen, nicht aber zu einer Erhöhung der Elementmassenströme. Das toxische Potenzial der anorganischen Komponenten dürfte von der Vollständigkeit der Verbrennung unabhängig sein - im Gegensatz zu den organischen Emissionen. Eine Reduzierung dieser Emissionen durch vollkommenere Verbrennung reduziert in jedem Falle das toxische Potenzial.

Für eine Bewertung der Güte der Verbrennung bei minimalen Emissionen sind Parameter wie CO, C_nH_m, CO_2 und O_2, Gesamtstaubemissionen und energienormierte Emissionen von Schadelementen und die TEQs der organischen Schadverbindungen geeignet. Sie zeigen, dass der Pelletofen, der Pelletkessel mit Sekundär-

wärmetauscher (SWT), der Hackschnitzelkessel (Fichtenholzhackschnitzel) mit elektrostatischen Abscheidern (EA) und auch der Scheitholzkessel (Buchenscheitholz) die emissionstechnisch günstigsten Anlagen sind. Der Scheitholzkessel (Fichtenscheitholz) und der Hackschnitzelkessel (betrieben mit Miscanthuspellets) sind wie auch die Großfeuerungsanlage verhältnismäßig ungünstige Anlagen. Suboptimale Verbrennungseinstellungen des Hackschnitzelkessels für den Brennstoff Miscanthus verursachen die höchsten gemessenen Emissionen. Ein Betrieb der Anlagen unter Befolgung der Angaben der Hersteller bezüglich Einstellungen und Brennstoff ist für einen emissionsarmen effizienten Betrieb absolut erforderlich.

Beim Kaminofen sind die Gesamtstaubemissionen ebenfalls sehr hoch, können aber durch Einsatz eines EA wie auch beim Hackschnitzelkessel deutlich reduziert werden. Ein SWT führt ebenfalls zu einer Reduzierung der Emissionen, so dass auch dessen Einsatz als sinnvoll erachtet wird. Generell sind diese sekundären Abscheidemaßnahmen wichtige Möglichkeiten zur Reduktion der Emissionen.

Auch die Brennstoffart kann erkennbar die Emissionen beeinflussen. Fichtenscheitholz erzeugt geringere Emissionen als in der gleichen Anlage eingesetztes Buchenscheitholz. Beim Scheitholzkessel erzeugt dagegen Buchenscheitholz niedrigere Emissionen. Entscheidend bestimmt auch die Brennstoffform die Emissionen. Die Emissionen bei der Verbrennung von Pellets im Pelletofen bzw. -kessel sind erheblich kleiner als die Emissionen bei der Verbrennung von Holzhackschnitzeln und insbesondere bei Scheitholz. Inzwischen können effiziente, bedienerfreundliche Holzöfen so konstruiert und ausgestattet werden, dass eine nahezu vollkommene Verbrennung erreicht wird mit einer Minimierung der Bildung von toxischen oganischen Verbindungen (Ruß etc.), Feinstaub und Kohlenmonoxid, deren Gehalte deutlich niedriger als die Grenzwerte der neuesten Fassung der Bundes-Immissionsschutzgesetzes liegen (Kap. 3.11).

Literatur

Andersson, O. &. Marklund, S. (1998). Emissions of organic compounds from biofuel combustion and influence of different control parameters using a laboratory scale incinerator. *Chemosphere* 36, 1429-1443.

Christensen, K.A., Stenholm M., Livbjerg H. (1998). The formation of submicron aerosolparticles, HCl and SO_2 in straw-fired boilers. *Journal of Aerosol Science* 29, 421-444.

Ferge, T., Maguhn, J., Hafner, K., Mühlberger, F., Davidovic, M., Warnecke, R. & Zimmermann, R. (2005). On-Line Analysis of Gas-Phase Composition in the Combustion Chamber and Particle Emission Characteristics during Combustion of Wood and Waste in a Small Batch Reactor. *Environmental Science & Technology* 39 (6), 1393-1402.

Klippel, N. & Nussbaumer, T. (2007). *Wirkung von Verbrennungspartikeln - Vergleich der Umweltrelevanz von Holzfeuerungen und Dieselmotoren.* In: Bundesamt für Energie

und Bundesamt für Umwelt, Schlussbericht, Zürich 2007. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.verenum.ch/Publikationen/SBPartikelw.pdf

Oser M., Nussbaumer T., Müller P., Mohr M. & Figi R. (2003). *Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen: Beeinflussung der Partikelemissionen durch Primärmassnahmen und Konzept für eine partikelarme automatische Holzfeuerung (Low-Particle-Feuerung)*. Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, ISBN 3-908705-02-9, Bern 2003. Gesichtet am 30.4.2017: www.verenum.ch/Publikationen/Oser_Aerosol_2003_V2.pdf

Umweltbundesamt (2009). *Entwicklung der Luftqualität in Deutschland.* 18 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/3760.html

Umweltbundesamt (2015). *Luftqualität 2014 - vorläufige Auswertung.* 18 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hintergrund_luftqualitaet_2014.pdf

2.1.11 Synthese der Antworten aus den Schlüsselfragen auf lokaler Ebene

Jens Ibendorf

Hinsichtlich einer dezentralen nachhaltigen Energieversorgung ist die lokale bzw. betriebliche Ebene eine der relevanten Entscheidungsebenen. Speziell im Bereich der Bioenergie, wo vorwiegend landwirtschaftliche Anlagen betrieben werden (Höher 2013), sind lokale Potenziale und Restriktionen Gründe für oder gegen eine Produktion und energetische Nutzung der Biomasse im Sinne der Nachhaltigkeit. Hier besteht dementsprechend auch verstärkter Bedarf an Information und Entscheidungsunterstützung. Speziell die Aspekte, die zu einer Akzeptanzverringerung oder -verbesserung führen, haben lokale Auslöser.

Die Konflikte auf der lokalen Ebene wurden bereits in den Kapiteln 2.1.2 und 2.1.8 dargestellt. Im Rahmen des Projektes arbeiteten die verschiedenen Arbeitsgruppen an Lösungsstrategien, um die diversen lokalen Konflikte zu reduzieren. In Tabelle 2 sind die verschiedenen Problembereiche, erarbeitete Problemminimierungsstrategien und lokale Auswirkungen auf Umwelt, Ökonomie und Gesellschaft dargestellt. Dabei wird deutlich, dass nur durch eine Mischung verschiedener Maßnahmen die Produktion und die Nutzung der Biomasse nachhaltig gestaltet werden können. Auf der lokalen Ebene wird besonders der bisherige Anbau von nachwachsenden Rohstoffen als kritisch betrachtet. Mit dem konventionellen Anbau von Energiepflanzen werden vorwiegend eine Zunahme von Monokultur und eine Reduktion der Artenvielfalt verbunden. Entscheidend ist aber die Art und Weise des Anbaus (dies trifft nicht nur auf Energiepflanzen, sondern auch auf Futter- und Lebensmittel zu). Diese Besorgnis führte in den letzten Jahren zu einer Abnahme der Akzeptanz für Bioenergie (Kress & Landwehr 2012; Kap. 1.1, 3.8).

Der integrative Energiepflanzenbau versucht dabei, eine Brücke zwischen der Nutzung und dem Schutz der Landschaft zu schlagen. Im Rahmen dieses Konzeptes werden die Kulturartenanzahl in der Fruchtfolge erhöht und Dauerkulturen, Untersaaten und Mischkulturen und neue Energiepflanzen integriert. Um die Landwirte bei einer Transformation hin zu einer erhöhten Strukturvielfalt zu unterstützen, können mit der Betriebsmanagementsoftware MANUELA (Kap. 2.1.6 und 3.5) ökologische und ökonomische Auswirkungen dargestellt werden. Für noch unbekannte Kulturen kann das Biomassepotenzialmodell BioSTAR (siehe Kap. 2.1.6.1 und 3.4) schlaggenaue Erträge abschätzen und somit den Landwirten auch ökonomische Auswirkungen aufzeigen.

Wie in Tabelle 2 aufgezeigt, werden mit den neuen Anbau- und Bewertungsmaßnahmen Entscheidungsunterstützungen zur Erhöhung der Artenvielfalt, zur Verringerung der Erosion und der THG-Emissionen und einer Verbesserung der Humusbilanz geliefert (Kap. 2.1.4, 2.1.5 und 2.1.6).

Tabelle 2-2: Problemminimierungen und lokale Auswirkungen auf Umwelt, Ökonomie und Gesellschaft

Problem bereiche	**Maßnahmen/Handlungsempfehlungen/ Entscheidungsunterstützungen zur Problemminimierung**	**Lokale Verbesserungen von Umwelt, Ökonomie und Gesellschaft**
Gefahr von Monokulturen, Monotonisierung der Kulturland-schaft, Redukti-on der Biodiver-sität	Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Artenvielfalt durch integrativen Energiepflanzenbau ,z .B. alternative einjährige und mehrjährige Kulturen, Wildkräuter, Zweikulturnutzung und Mischkulturen (Silphie, Wildkräuter, Dauergräser, Malve, Wintertriticale, Sommergetreide u.a.; Kap. 2.1.3) Darstellung und Bewertung (ökologisch, ökonomisch) von Betriebsleistungen in Hinblick auf Biodiversität durch Betriebsmanagementsoftware MANUELA (Blühstreifen, Gehölzstreifen, Ackerrandstreifen, stehenlassen von Stoppeln im Winter; Kap. 2.1.3, 2.1.4) Schlaggenaue Abschätzung von Biomasseerträgen alternativer Kulturen durch BioSTAR (Kap. 2.1.6.1)	Erhöhung der Kulturartenanzahl in der Fruchtfolge, Erhöhung der Strukturvielfalt in räumlicher und zeitlicher Sicht, Erhöhung der Artenzahl der Begleitflora, Erhöhung der Nahrungs- und Deckungshabitate, lange Blütezeiten (ideal für Bienen und andere Insekten), Verringerung von Krankheiten (Maiszünsler u.a.), Reduktion der Ertragsunsicherheit bei alternativen Kulturen Betriebsgenaue Kostenkalkulation von pflanzenbaulichen und naturschutzfachlichen Umstellungen Beleg für die Einhaltung bestimmter Vetragsverpflichtungen Erhöhung der Akzeptanz bzgl. Bioenergie bei Landwirten, Anwohnern und anderen Interessensgruppen (z. B. Naturschutz)
Humusbilanz der Ackerflächen	Handlungsempfehlung integrativer Energiepflanzenbau; Dauerkulturen (Silphie, Malve, Dauergräser; Kap. 2.1.4.1), Rückführung des organischen Gärsubstrates	Verbesserung des C/N-Verhältnisses und Ausgleich der Humusbilanz, Sicherung der Ertragsfähigkeit, bessere Verfügbarkeit der Nährelemente durch Gärrestdüngung
Bodenerosion	Handlungsempfehlung integrativer Energiepflanzenbau; Untersaaten, Zweikulturnutzung (Kap. 2.1.3, 2.1.4)	Stabilisierung der Bodenstruktur, Verringerung der Wind- und Wassererosion durch ganzjährige Bedeckung
Emissionen durch Verbrennung pflanzlicher Energieträger	Optimierung der Holz- und Strohverbrennung unter Anwendung modernster effizienter Techniken (Minimierung von Schadstoffemissionen durch Regelung und Abscheidung; Kap. 2.1.10)	Verringerung der Emissionen an Feinstaub und an Schadstoffen
Treibhausgas bilanz (insbesondere N_2O und CH_4)	Dauerkulturen auf Niedermoorböden, Darstellung und Bewertung (ökologisch, ökonomisch) von Betriebsleistungen in Hinblick auf Treibhausgase durch Betriebsmanagementsoftware MANUELA (Kap. 2.1.3, 2.1.6)	Verringerung der THG-Emissionen, Bewerbung der Maßnahmen zur Optimierung des nachhaltigen Betriebsmanagements und deren Kostenkalkulation Beleg für die Einhaltung bestimmter Vetragsverpflichtungen
Nutzung belasteter Flächen für Nahrungs- und Futtermittel	Nutzungskonzepte und -abwägungen mit ein- und mehrjährigen Energiepflanzen (inkl. KUP) mit hohem Ertrag und geringem Schadelementtransfer Boden-Pflanze (Kap. 2.1.9)	Kein Inverkehrbringen von gering belasteten Futter- und Lebensmitteln, Weiternutzung der belasteten Areale durch energetische Nutzung, Rückführung des Gärrestes nur auf die belasteten Areale

Negativimage von Bioenergie, Akzeptanzprobleme vor Ort, intransparente Entscheidungen	Erfolgsfaktoren und Hemmnisse für dezentrale Energieprojekte, Procederewissen für die Initiierung von solchen Projekten, Multikriterielle Entscheidungsunterstützung (MCDA), (Kap. 2.1.1)	Verbesserung der Transparenz, Kommunikation und Beteiligung aller Interessensgruppen am Entscheidungsprozess, Erhöhung der Beteiligungsmotivation und der Identifikation mit Projekten
Keine oder ineffiziente Wärmenutzung	Flexible Modellierung und ökonomische Berechnung von Nahwärmenetzen in Abhängigkeit von Wärmeabnehmern und Anlagenkonfiguration (Kap. 2.1.7)	Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Nahwärmenetzen;
Nicht optimale Kapazitäts- und Standortwahl	Kapazitäts- und Standortmodellierung anhand des Kapitalwertes (Kap. 2.1.7)	optimierte Kapazitäts- und Standortwahl der Biogasanlage in Abhängigkeit von Transport, Biodiversität und Wärmenutzung

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass ertragsreiche ein- und mehrjährige Energiepflanzen mit geringem Aufnahmevermögen für Schadelemente eine sinnvolle Alternative auf belasteten Standorten sein können (Kap. 2.1.9). Somit könnten diese Flächen aus der Nutzung für Futter- und Lebensmittel herausgenommen werden, und die Landwirte hätten, auch bei einer Absenkung der Schadelement-Grenzwerte für Futter- und Lebensmittel, weiterhin die Möglichkeit, auf diesen Standorten zu produzieren.

Diese Ergebnisse zielen auf die *nachhaltige Produktion* von Nachwachsenden Rohstoffen ab. Gleichzeitig ist die *lokale nachhaltige Nutzung* von Bioenergie ein wichtiges Standbein bei der Transformation des Energiesystems. So kann man immer noch feststellen, dass bei vielen Bioenergieanlagen effiziente Wärmenutzung bei der BHKW-Stromproduktion aufweisen (externer Wärmenutzungsgrad in Niedersachsen lag 2011 bei 30 %, siehe Höher 2013). Mit der verpflichtenden Wärmenutzung seit Einführung des EEG 2012 stieg zwar der prozentuale Anteil der externen Wärmenutzung, aber eine Ausrichtung der Anlagenstandorte entsprechend der Wärmesenken oder eine Kapazitätsberechnung entsprechend der Wärmenutzung finden immer noch zu wenig statt. Im Projekt wurden Modelle entwickelt, die Nahwärmenetze und Anlagenstandorte flexibel berechnen (Kap. 2.1.7). Mit Hilfe des Kapitalwertes kann hier bestimmt werden, welche ökonomischen Auswirkungen zusätzliche Wärmekunden und Veränderungen des Netzverlaufes haben. Damit können schnell und transparent unterschiedliche Nahwärmenetzverläufe miteinander verglichen werden. Diese Modellierung zeigt somit den ökonomisch effizienten Verlauf und kann die Anschlussfähigkeit, auch entlegener Häuser, optimal darstellen. Ein weiteres Modell berechnet ebenfalls an Hand des Kapitalwertes den ökonomisch effizienten Anlagenstandort und die Anlagenkapazität. Diese Berechnung erfolgt in Abhängigkeit von Wärmenutzung, Transport und Ertrag der Energiepflanzen. Bei der Bestimmung des Energiepflanzenertrages werden die Daten aus dem „Integrativen Energiepflanzenbau" genutzt. Somit fließen in diese ökonomischen Berechnungen auch pflanzenbauliche und ökologische Aspekte hinein.

Mit der zunehmenden lokalen Verbrennung fester Biomasse im Winter ist eine Erhöhung der lokalen Emissionen verbunden (insbesondere, wenn unvollkomme-

ne Verbrennung z. B. in Öfen stattfindet). Sekundärmaßnahmen wie Staubminderungsmaßnahmen in Form elektrostatischer Abscheider (EA) und Kondensationswärmetauscher (KWT) sind neben Nutzerverhalten (optimale Bedienung) und Qualität des eingesetzten Brennstoffs wichtige technische Maßnahmen, die organischen und anorganischen Feinstaubemissionen bei der Verbrennung von Holz und Stroh zu verringern (siehe Kap. 2.1.10).

Alle diese genannten Maßnahmen haben nicht nur ökologische und ökonomische, sondern auch soziale und gesellschaftliche Effekte vor Ort. Mit der Erhöhung der Strukturvielfalt auf den Äckern steigt die Akzeptanz für den Energiepflanzenbau und die Bioenergie in der Bevölkerung, aber auch innerhalb der Landwirtschaft (siehe Kap. 0 und 2.1.8.4). Mit Hilfe der Darstellung der Kosten bei unterschiedlichen Nahwärme-Netzverläufen und Wärmeabnehmern können die Mitglieder von Betreibergesellschaften und Bioenergiegenossenschaften Präferenzen bestimmen, unter welchen Bedingungen auch abgelegene Gebäude an das Nahwärmenetz angeschlossen werden (siehe Kap. 2.1.7). Auch die ökonomische Modellierung des Anlagenstandortes ist ein Instrument zur Unterstützung bei Entscheidungsprozessen vor Ort und kann zu einer Versachlichung der Debatten beitragen.

Neben den oben erwähnten sozialen Effekten der ökologischen und ökonomischen Maßnahmen verbessern die erarbeiteten Erfolgsfaktoren sowie das gesamte Procederewissen den Entscheidungsprozess zu nachhaltigen dezentralen Energieprojekten. Damit dezentrale Energieprojekte erfolgreich durchgeführt werden können, sind folgende Charakteristika förderlich:

- Vorhandensein einer guten Dorfgemeinschaft
- Legitimation durch Entscheidungsträger (Bürgermeister)
- Transparenter Informations- und Kommunikationsprozess
- Demokratische Entscheidungen in Dorfversammlungen treffen (öffentliche Legitimation)
- Kontinuierliche Beteiligung aller Mitbürger auch bei Entscheidungen ermöglichen; auch bei der finanziellen Beteiligung
- Best-Practice-Fahrten in zu bereits realisierte kommunale Energieprojekte
- Einbindung externer Experten (Wissenschaftler, Ing.-Büros u.a)
- Externe Moderation durch den gesamten Entscheidungsprozess gewährleisten
- Durchführung von Planungswerkstätten
- Etablierung von Arbeitsgruppen zu verschiedenen Themen und Steuerungs/ Koordinierungsgruppe
- Genossenschaftsmodell als Betreibernodell für die Biogasanlage

Die dialoggeführte Kommunikation verringert die Präsenz von üblichen Machtstrukturen. Die Multikriterielle Entscheidungsunterstützung (MCDA) kann die

vielen zu beachtenden Kriterien strukturieren, mit Daten hinterlegen und damit eine sachliche Unterstützung bei der Bewertung der unterschiedlichen Kriterien leisten (siehe Kap. 0, 2.1.2). Wichtige Ergebnisse dabei können eine Erhöhung der Transparenz und eine stärkere aktive Beteiligung aller Interessensgruppen im gesamten Entscheidungsprozess sein. Durch diese konsensorientierte Herangehensweise lassen sich potenzielle zukünftige Konflikte ausräumen bei gleichzeitiger Erhöhung die Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber diesen Projekten.

Literatur

Höher, G. (2013). *Biogas und Biomethan. Wichtige Treiber der Energiewende in Niedersachsen.* Vortrag Dena-Forum, Hannover 18.4.2013. Gesichtet am 30.4.2017. http://www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/documents/Veranstaltungen/2013/Biomethan__Der_Dialog/Vortr%C3%A4ge_Hannover/Biomethan_Der_Dialog_18.4._Hoeher.pdf

Kress, M., Landwehr, I (2012). Akzeptanz erneuerbarer Energien in EE-Regionen. *Diskussionspapier des IÖW* 66/12. Berlin. Gesichtet 17.01.14: http://www.ioew.de/uploads/tx_ukioewdb/IOEW_DP_66_Akzeptanz_Erneuerbarer_Energien.pdf

2.2 Regionale Schlüsselfragen: Konfliktvermeidung einer nachhaltigen Produktion und energetischen Nutzung von Biomasse auf regionaler Ebene

2.2.1 Wie kann auf regionaler Ebene die Entwicklung hin zu einer nachhaltigen Biomasseproduktion und -nutzung begleitet werden?

Peter Schmuck, André Wüste, Marianne Karpenstein-Machan, Ines Wilkens, Cornelia Grote-Bichoel

Zielgruppen: Bürgermeister, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager, Regionalmanager, Landrat, Landkreisverwaltungen

Die Energiewende hin zu Erneuerbarer Energie (EE) als Teil eines großen Transformationsprozesses ist eine große Infrastrukturmaßnahme, eine Modernisierung, die gerade dem ländlichen Raum Entwicklungschancen bietet: Vermehrte Aufträge für das Handwerk, Raum für Innovationen und neue Kooperationen in der Region. Ausgleichsmaßnahmen für Bauwerke können eine Finanzierung für sinnvolle Biotopentwicklungen bieten. Die Wertschöpfung durch die regionale Energieproduktion und neue Wege bei der Vernetzung von Wärmeproduktion und -Wärmeabnehmern z.B. bei der Quartiersversorgung stärken Unternehmen und Kommunen.

Nachhaltige Biomasseproduktion und -nutzung als Teil dieser Transformation lässt sich nur im Rahmen eines Gesamtkonzeptes für die Transformation des Energiesystems verwirklichen. Für dieses bestehen dann gute Realisierungschancen, wenn es a) zyklisch angelegt, b) von einem konkreten Ziel her „rückwärts" gedacht wird und c) in einer Region oder einem Landkreis mindestens ein „Energiewendeorganisator" hauptamtlich für diese Tätigkeit zur Verfügung steht. Die Analyse erfolgreicher Entwicklungen auf regionaler Ebene (Landkreise Steinfurt, Bamberg
oder Kaiserslautern) zeigt, wie dort Elemente eines sogenannten „zyklischen Nachhaltigkeitsmanagements" umfassend realisiert werden (Phlipp et al. 2017). Folgende Schritte sind tragende Prozessbestandteile eines Planungs- und Umsetzungzyklus:

1. Eine *Bestandsaufnahme* bezüglich der Energiebilanzen (wieviel Energie wird derzeit in den verschiedenen Sektoren im Landkreis produziert und verbraucht, welche Anteile liefern erneuerbare Energieanlagen?) mündet in einen Bericht und wird parallel vom Aufbau organisatorischer Strukturen (Task force „Energietransformation") im Landkreis begleitet. Eine Stelle für mindestens

eine Person, welche für Beratung, als Informationsdrehscheibe und als unabhängiger Ansprechpartner fungiert, der zwischen lokalen Projektinitiatoren, Lokalpolitik, Bevölkerung, lokalen Wirtschaftsbetrieben und ggf. Bildungseinrichtungen vermittelt, ist eine mittelfristige Finanzierung sicherzustellen (z.B. druch Landkreismittel, anteilige Finanzierung durch Kommunen, durch Bundesförderprogramme).

2. Mit Entscheidungsträgern des Landkreises ist im Rahmen von Zukunftswerkstätten eine *Zukunftsvision* für die 100% EE-Versorgung zu entwickeln (z.B. mit dem Simulations-Tool 100prosim; Schmidt-Kahnefendt 2017). Eine Entscheidung ist zu fällen, bis wann die Vision erreicht werden soll. Auf Basis der Bestandsaufnahme sowie der Vision und aus abgeleiteten Zwischenzielen wird ein konkretes Handlungsprogramm mit Optionen für den EE-Ausbau abgeleitet. Da die EE in aller Regel den derzeitigen Bedarf an Energie nicht abdecken können, kommen Effizienz und Suffizienz-Maßnahmen zusätzlich ins Blickfeld. Dazu werden ganztägige Planungswerkstätten mit zentralen Akteuren aus Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Zivilgesellschaft durchgeführt. Die Optionen können unter Einbeziehung der Akteure mit multikriteriellen Methoden der Entscheidungsunterstützung bewertet werden (vgl. Kap. 3.8).
3. Zukunftsvision und Handlungsprogramm werden den Landkreisparlamenten zum *Beschluss* vorgelegt. Der Zeithorizont beträgt mindestens 10 Jahre und enthält Festlegungen, wann und wie die Umsetzung des Programms durchgeführt wird.
4. *Umsetzung und Monitoring*. Ausgewählte Leitprojekte aus dem Handlungsprogramm werden umgesetzt, wobei ein Wissenschaftlerteam die Realisierung gemeinsam mit den Verantwortlichen aus dem Landkreis koordinieren und begleiten kann.
5. *Berichterstattung und Evaluation*. Am Ende einer Planungsperiode wird die Bestandsaufnahme vom Beginn des Projektes aktualisiert und kritisch analysiert. Es werden neue Ziele und Maßnahmen für die Folgephasen abgeleitet und der Zyklus geht somit in die nächste Runde.

Dieses Vorgehen stellt eine aussichtsreiche Alternative zu weit verbreiteter „ballistischer Planung“ dar: Bei dieser Planung liegt keine präzise Bestandsaufnahme des Ist-Zustands vor, werden nur vage Zielvisionen ohne konkretisierte Handlungsziele erstellt (z.B. „Klimaschutzmaßnahmen“ wie Austausch von Beleuchtungskörpern, deren Emissionsreduktionseffekt durch Rebound-Effekte an anderen Stellen der Region wieder annulliert werden), werden keine explizit für die Transformation zuständigen Personalstellen in den Landkreisverwaltungen geschaffen und damit können auch Umsetzung, Monitoring und Evaluation nicht systematisch begleitet werden.

Im Rahmen des „zyklischen Nachhaltigkeitsmanagements“ können Konflikte frühzeitig erkannt und gemeinsam Lösungsmöglichkeiten gesucht werden. Dabei können u.a. multikriterielle Analysen als Kommunikationstool (MCDA, siehe Kap.

2.1.1 und 3.8), externe Experten (für Faktenkonflikte) und neutrale Moderatoren (für Interessen-, Wert- und Beziehungskonflikte) genutzt werden.

Drei Prozesskomponenten haben sich in unserer Arbeit der vergangenen 15 Jahre als außerordentlich förderlich für den EE-Ausbau auf Regionsebene erwiesen:

1. *Erfahrungsaustausch* mit Vertretern aus Regionen, welche den Gesamtprozess bereits früher begonnen haben: In solchen Regionen, also vor Ort, können Inspirationen aufgenommen werden, wie es im eigenen Landkreis gehen könnte (2011 waren Landkreispolitiker unserer Modell-Regionen im Bioenergiedorf Barlissen eingeladen, dies führte zu einem Beschluss der Förderung von EE-Kommunen in einem der Landkreise). Charismatische Organisatoren der Energiewende einladen. Einschlägige Konferenzen besuchen, wo solche Innovatoren anzutreffen sind.
2. *Partizipationsprinzip auch bei der Finanzierung*: Reguläre und Sonderförderungsmöglichkeiten eruieren. Wenn diese ausgeschöpft sind: Zuerst die Finanzierung aus lokal verfügbaren Ressourcen fokussieren, also durch Menschen in der Region, bevor Fremdinvestoren für Restanteile gesucht werden (Prinzip Bürger-EE-Anlagen, Bürgerwindparks). Genossenschaftlich organisierte Betreibergesellschaften haben sich bezüglich der Akzeptanz der Anlagen in der Region bestens bewährt.
3. *Leuchttürme in der Region schaffen*: Sensibilisierte Personenkreise in der Region finden und vernetzen. Die Herausforderung besteht hier darin, verfügbare Zeit-, Finanz-, Personalressourcen gezielt denjenigen Personen zukommen zu lassen, die hochgradig motiviert sind für die Initiierung von konkreten Projekten vor Ort. Damit kommen die Personen aus der Wissenschaft oder der Regionalpolitik, welche EE-Transformationen anstoßen möchten, aus der Rolle des Top-Down „Drückers“ („Ihr müsst doch jetzt mal was für Kinder und Enkel tun!“) in die Rolle des Unterstützers von partizipativen Bottum-up Prozessen. Als Instrument hat sich in unserer Arbeit der Wettbewerb seitens lokaler Initiatorengruppen um Unterstützung (finanzieller und organisatorischer Art) bewährt. Bisherige Wettbewerbe hatten folgende Ergebnisse:
   a. 2000 Landkreis Göttingen. Wettbewerb zur Unterstützung des ersten Bioenergiedorfs in Deutschland. Preis: 30% Förderung der Investition, Förderung der Machbarkeitsstudie (MBS) und der sozialen Begleitung und Forschung. 17 Bewerber, bis 2005 entstand das Bioenergiedorf Jühnde.
   b. 2006 Landkreis Göttingen. Wettbewerb zur Unterstützung einer MBS und soziale Begleitung für 5 Bioenergiedörfer. Preis: Soziale Begleitung und MBS für fünf Dörfer. Ca. 35 Bewerber, bis 2009 entstanden vier Bioenergiedörfer.
   c. 2012 Landkreis Wolfenbüttel. Wettbewerb zur Unterstützung von EE-Kommunen. Preis: Soziale Begleitung und MBS für zwei Dörfer. Vier Bewerber, MBS läuft derzeit (Oktober 2013) in zwei Dörfern.

d. 2013 Landkreis Teltow-Fläming. Wettbewerb zur Unterstützung von kommunalen EE-Projekten. Preis: MBS und soziale Begleitung für 2 Projekte. Fünf Bewerbungen, MBS läuft derzeit (Oktober 2013) in zwei Projekten.

Zu vermeidende *Gefahren/Irrwege* bei der EE-Transformation bestehen darin, dass sich die Bemühungen im sog. „Greenwashing“ erschöpfen (Lippenbekenntnisse, unklare abstrakte Zielvorgaben wie „100% EE-Region“ oder „Zero Emission“-Region ohne Zeithorizonte und Maßnahmenfahrplan), dass Nachhaltigkeit ausschließlich sektoriell auf EE bezogen wird, ohne andere Lebensbereiche sowie Gerechtigkeitsfragen als Kontext zu thematisieren (siehe Kap. 1.3.2). Wenn z.B. die Energiewende als bloße Substitution von fossil-nuklearen Energieressourcen durch erneuerbare verstanden wird, ohne dabei Nachhaltigkeitskriterien zu berücksichtigen, kann das zu gesellschaftlichen und volkswirtschaftlichen Entwicklungen führen, welche diesen Kriterien zuwiderlaufen („Vermaisung“, gleichzeitige unreflektierte Planungen für Infrastrukturmaßnahmen, welche unterschiedliche künftige Energieszenarien anstreben, z. B. dezentrale Energiespeichertechnik und Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstrassen).

Literatur

Philipp, A., Kuhn, S. & Kron, D. (2007). Kommunen steuern in eine nachhaltige Zukunft - Handbuch Projekt21 - Einstieg in ein zyklisches Nachhaltigkeitsmanagement. ICLEI (Hrsg): *Local Governments for Sustainability*. 72. S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.nachhaltigkeit-kommunal.eu/fileadmin/files/Handbuch-Projekt21_Druck.pdf

Schmidt-Kahnefendt, H.-H. (2017). *Zielperspektiven entwickeln für 100%-Erneuerbare-Energien-Regionen*. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.wattweg.net

2.2.2 Wie können regionale Auswirkungen der energetischen Biomassenutzung dargestellt werden? Wie können Biomassepotenziale von alternativen Energiepflanzen ermittelt werden? Wie kann die energetische Biomassenutzung mit Natur- und Landschaftsschutzansprüchen in einer Region zusammengeführt werden?

Christian Albrecht, Roland Bauböck

Zielgruppen: Landwirte, Bürgermeister, interessierte Bürger, Naturschützer, Klimaschutzmanager, Regionalmanager, Landräte, Landkreisverwaltungen

2.2.2.1 Nutzungsansprüche identifizieren und zusammenführen

In einer intensiv genutzten Kulturlandschaft, wie sie in Deutschland existiert, ist es von großer Bedeutung, die vorhandenen Flächen und Flächenpotenziale effektiv und sinnvoll zu nutzen. Die Nutzungsansprüche, die heute an unsere Ackerflächen, Grünlandflächen und Waldgebiete gestellt werden, sind vielfältig. Zusätzlich zu ökonomischen Ansprüchen (Produktion von Gütern und Energie) sind auch der Schutz von Natur und Landschaft ein gesellschaftlich und politisch gewolltes Ziel. Die kontinuierliche Ausweitung von Siedlungs- und Infrastrukturflächen verschärft den Druck auf die Kulturlandschaft zusätzlich. Insbesondere die rasante Zunahme des Energiepflanzenanbaus seit der Einführung des EEG hat zu einer anhaltenden Diskussion um die Frage geführt, welche Landnutzungen vorrangig sind (Tank-Teller-Trog-Diskussion, Landschaftsbild, Artenschutz) und wie viel Bioenergie wir uns hier in Deutschland eigentlich leisten können, ohne andere wichtige Nutzungen und Funktionen, wie die Lebensmittelproduktion oder die Ökosystemfunktion unserer Landschaft, zu beeinträchtigen. Aufgrund von räumlicher Begrenzung (Endlichkeit der Flächen) und einer breit gestreuten Interessenslage kommt es zu Zielkonflikten bei der Nutzung der Landschaft. Dies zeigt sich z. B. bei der Frage der THG-Emissionen, wenn Energiepflanzenanbau auf Niedermoorböden betrieben wird (vgl. Abbildung 2-3) oder beim Anbau von Mais auf Böden mit Erosions- oder Nitratauswaschungsgefährdung. Auch die Beeinflussung der Artenzusammensetzung und die Veränderung des Landschaftsbildes, die mit einem hohen Maisanteil in den Fruchtfolgen einhergehen, sind Teil der regionalen Auswirkungen des heute praktizierten Energiepflanzenanbaus. Diese Auswirkungen zu identifizieren und mögliche Lösungsansätze aufzuzeigen, ist ein zentraler Forschungsgegenstand der Autorengruppe (vgl. auch Kap. 3.3, 3.4 und 3.5). Die Nutzung von Bioenergie und der damit verbundene Energiepflanzenanbau sind, wie auch der Schutz von Natur und Landschaft, politisch und gesellschaftlich gewollt. Unbestreitbar ist jedoch auch, dass es unbeantwortete Fragen hinsichtlich der räumlichen Verteilung, des Anbauspektrums und einer möglichen Ausweitung des Energiepflanzenanbaus gibt.

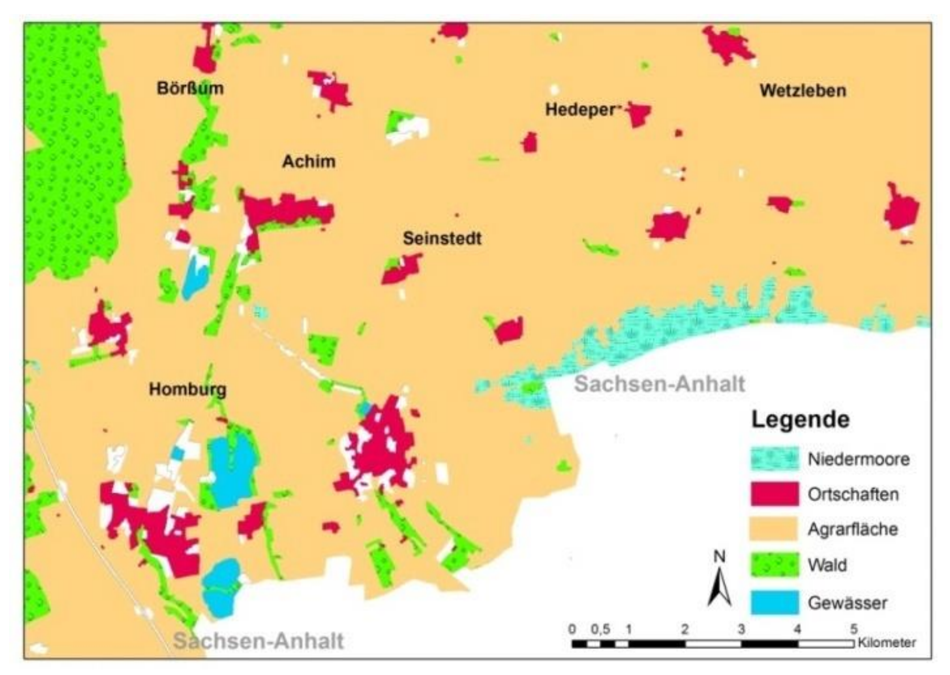


Abbildung 2-3: Nutzungskonflikt Landwirtschaft auf Niedermoorböden im südlichen Landkreis Wolfenbüttel

2.2.2.2 Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus und Erfassungsmethoden

Die Analyse von Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf Natur und Landschaft einer Region steht prinzipiell vor komplexen Herausforderungen: Bisher liegen nur unvollständiges Wissen über die komplexen Wechselwirkungen des Anbaus verschiedener Fruchtarten auf unterschiedliche Landschaftsfunktionen bzw. Ökosystemleistungen vor. Vorhandende Daten, wie bspw. die im sogenannten INVEKOS-System erfassten Informationen zur Verteilung von Fruchtarten auf den Ackerflächen oder die genauen Standorte der Biogasanlagen in der Region Hannover, konnten aus datenschutzrechtlichen Gründen für diese Arbeit nicht zur Verfügung gestellt werden. Eine weitere Herausforderung ist die Schwierigkeit der Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der Landwirtschaftspolitik, des Agrarmarktes sowie des individuellen Verhaltens der Landwirte in der Region Hannover. Hinzu kommen zusätzliche Einflüsse durch den voranschreitenden Klimawandel.

Um unter diesen Bedingungen mögliche Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf Natur und Landschaft analysieren zu können, bietet sich die Szenariomethode an (vgl Alcamo et al. 2008; Albert et al 2012). Bei dieser Methode werden plausible Annahmen über zukünftige Entwicklungen getroffen, mögliche Auswirkungen auf die Landnutzung simuliert und potenzielle Effekte auf Natur und Land abgeschätzt. Als Fallbeispiel wurde die Region Hannover mit Fokus auf den Anbau von Energiemais als momentan wichtigste Fruchtart für die Biogaspro-

duktion betrachtet. Die berücksichtigten Ökosystemleistungen waren Lebensräume (Indikator: Ackerbiotopwerte), die Nahrungsmittelproduktion (Indikator: Selbsternährungsgrad), sowie das Landschaftsbild (Indikator: Fruchtartendiversität). Das Vorgehen gliederte sich in drei Schritte (für Details, siehe Kap. 3.5): a) Erstellung einer Landnutzungskarte mit dem Status quo der Fruchtartenverteilung und der Biogasproduktion, b) Entwicklung von Szenarien und Simulation entsprechender Landnutzungsänderungen, und c) Analyse der Szenarioauswirkungen auf die ausgewählten Ökosystemleistungen.

2.2.2.3 Ermittlung von Biomassepotenzialen alternativer Energiepflanzen

Ein wichtiger Anknüpfungspunkt zur Verminderung negativer Auswirkungen auf Natur und Landschaft sind eine Verminderung des Maisanteils zur Bioenergieerzeugung und die stärkere Berücksichtigung alternativer Energiepflanzen. Für die kleinmaßstäbige (Region, Landkreis) Berechnung von Ertragspotenzialen alternativer Energiepflanzen kann das Pflanzenmodell BioSTAR herangezogen werden (weitere Erläuterungen siehe Kap. 3.4). Aufgrund der guten Datenverfügbarkeit in Deutschland allgemein und insbesondere für Niedersachsen, lassen sich Energiepflanzen-Ertragspotenziale auf der Maßstabsebene 1:50.000 (Bodenübersichtskarte) für jede Region Niedersachsens mit dem Modell BioSTAR erstellen und kartografisch darstellen. Diese Potenzialkarten können dann für die An- und Ausbauplanung im Bioenergiebereich herangezogen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, diese Daten im GIS mit Restriktions- und Ausschlussflächen zu verschneiden und somit Fehlplanungen im Energiepflanzenanbau im Vorfeld abzufangen. Eine zukünftige Planung im Bioenergiebereich muss stärker als bisher auf regionale Unterschiede bei der Landschaftsausstattung eingehen und benötigt daher eine gute Datenbasis für die Entscheidungsfindung.

2.2.3 Regionale Wirtschaftskreisläufe: Wohin fließt das Geld bei dezentralen Bioenergieprojekten?

Volker Ruwisch

Zielgruppen: Ingenieurbüros, Bürgermeister, interessierte Bürger, Anlagenbetreiber, Klimaschutzmanager, Regionalmanager, Landräte, Landkreisverwaltung

Ein Merkmal der aktuellen Energieversorgung ist die hohe Importabhängigkeit bei den Energieträgern: Sie betrug im Jahr 2011 bei Uran 100 %, Mineralöl 99,5 %, Naturgasen 88,9 % und bei Steinkohle 88,5 %, nur bei Braunkohle fand ein Export in Höhe von 2,6 % statt. Insgesamt wurden damit 69,5 % der benötigten Energieträger importiert (BMWi 2017). Hiermit verbunden sind beträchtliche Abflüsse an Finanzmitteln in die Exportländer.

Die Erneuerbaren Energien - und hierbei insbesondere die Bioenergie - bieten hingegen durch ihre dezentrale Verfügbarkeit und Nutzbarkeit die Chance, regionale Wirtschaftskreisläufe zu stärken und damit Arbeits- und Lebensperspektiven im ländlichen Raum zu schaffen.

Als Region wird hier ein Umkreis von ca. 50 km um den Standort einer Bioenergieanlage definiert, kulturelle und andere regionsbildende Kriterien werden vernachlässigt. Zur Beantwortung der Frage, wohin das Geld bei dezentralen Bioenergieprojekten fließt, wird hier als Kriterium herangezogen, ob die beauftragten, rechnungsstellenden Firmen ihren Sitz innerhalb dieses Umkreises haben oder außerhalb. Werden z. B. die Tiefbauarbeiten bezahlt und hat die durchführende Firma ihren Sitz innerhalb dieses Umkreises, dann wird definitionsgemäß die Auszahlung regional wirksam; hat die Firma ihren Sitz außerhalb dieses Umkreises, dann nicht. Hierbei wird unterstellt, dass die Firmen die verkauften Güter und Dienstleistungen zu einem hohen Anteil am Firmensitz produzieren und dadurch die vom Bioenergieprojekt getätigten Überweisungen zum Rechnungsausgleich in diesen Firmen durch Lohnzahlungen, Materialeinkauf etc. entsprechend auch wieder zu einem großen Anteil innerhalb dieser Region verbleiben. Der Sitz der Bank der beauftragten Firmen wird vernachlässigt.

Zur Beantwortung der Frage werden hier zwei Phasen unterschieden a) die Investitionsphase und b) der laufende Geschäftsbetrieb. Ferner wird davon ausgegangen, dass der Betreiber der Bioenergieanlage selbst regional ansässig ist und nicht als z. B. bundesweit tätiger Investor immer „seine Firmen mitbringt".

2.2.3.1 Investitionsphase

Zum Aufbau eines Bioenergieprojektes muss am Anfang zunächst vor allem in Planungsleistungen, Grund und Boden, Sachanlagen und Rechte (z. B. Software) investiert werden. Die erworbenen Güter und Dienstleistungen sollen die Betriebs-

bereitschaft ermöglichen und stehen dem Betrieb über mehrere Jahre zur Verfügung.

Planungsleistungen können i. d. R. zu einem großen Anteil innerhalb der Region vergeben werden, da es kaum Regionen gibt, in denen keine entsprechenden Ingenieur- und/oder Architekturbüros vorhanden sind. Für eine regionale Vergabe dieser Leistungen spricht, dass Mitarbeiter ansässiger Firmen vor allem in der Bauphase häufiger vor Ort sein können als Mitarbeiter von sehr weit entfernten Büros. Für Letztere wird man sich vermutlich nur dann entscheiden, wenn in der Region nötiges Spezialwissen nicht vorhanden ist oder mit den ansässigen Firmen schlechte Erfahrungen gemacht worden sind. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass mit ansässigen Firmen bereits unterschiedliche Geschäftsbeziehungen bestehen, diese auch auf Folgeaufträge hoffen und deshalb stärker bemüht sind, gute Leistungen zu erbringen.

Der Ankauf von Grund und Boden als Baugelände wird üblicherweise innerhalb der Region zahlungswirksam. Es wird wohl eher selten der Fall sein, dass orts- oder regionsfremde Personen oder Firmen Flächen in den ländlichen Regionen besitzen und ausgerechnet diese Flächen dann als Standort für die Bioenergieanlagen ausgewählt werden.

Bei den Sachanlagen wird i. d. R. ein gewisser Teil der Auszahlungen z. B. für Tiefbauarbeiten, Hochbau- und Innenausbau regional wirksam, während Auszahlungen für die technischen Anlagen zumindest bundesweit wirksam werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb der betrachteten Region eine Firma z. B. die Betonfundamente gießen wird, ist groß, dass die Firma, die z. B. den benötigten Heizkessel produziert, zufällig auch innerhalb der Region ansässig ist, ist allerdings eher klein. Bei den Rechten für Softwarelizenzen etc. ist auch davon auszugehen, dass diese überregional eingekauft werden.

Bei der Errichtung des südniedersächsischen Bioenergiedorfes Jühnde im Landkreis Göttingen wurden von ca. 5,5 Mio. € Anfangsinvestitionen (einschl. der Umbauarbeiten in den an das Nahwärmenetz angeschlossenen Häusern) ca. 58 % und damit über 3 Mio. € regional wirksam. Es konnten u. A. fast alle Planungsarbeiten, die Tief- und Hochbauarbeiten, die Verlegung des Nahwärmenetzes, die Installationsarbeiten für die Heizungsanlagen etc. regional vergeben werden. Für die Finanzierung der Anfangsinvestitionen wurde ein Kredit von einer regional ansässigen Bank aufgenommen, so dass die hierfür zu leistenden laufenden Zinszahlungen auch innerhalb der Region zu Umsatz führen (siehe unten).

2.2.3.2 Laufender Geschäftsbetrieb

Im Unterschied zu Windkraft- oder Photovoltaikanlagen, bei denen die Abschreibungen (als Äquivalent für die zeitanteilige Nutzung der Sachanlagen) sowie die Zinsen für die aufgenommenen Kredite einen Großteil der jährlichen Kosten ausmachen und keine zusätzlichen Kosten für die Nutzung der Sonne oder des Windes anfallen, spielen bei Bioenergieprojekten die Kosten für die benötigten Ener-

gieträger in Form von Wirtschaftsdüngern, Silage und Holz eine große Rolle. Je nach Anlagengröße und aktuellem Preisniveau können diese 30 - 50 % der Gesamtkosten in der Gewinn- und Verlustrechnung betragen. Ferner fallen in einem deutlich größeren Umfang als bei Windkraft- oder PV-Anlagen Personalkosten an, da der laufende Betrieb mit Befüllungsvorgängen, Anlagensteuerung Wartungsarbeiten etc. sehr viel arbeitsaufwändiger ist.

Eine Analyse der Daten des Bioenergiedorfes Jühnde im Jahr 2007 hatte ergeben, dass von den jährlichen Kosten (ohne Abschreibungen, da diese bei den Investitionen berücksichtigt wurden) bereits ca. 60 % im Ort, vor allem für die Silage und die Mitarbeiter, und weitere ca. 25 % vor allem für Zinszahlungen und Versicherungen in der Region bleiben. Der größte Einzelposten, der außerhalb der Region zahlungswirksam wird, ist der Wartungsvertrag für das BHKW.

Dies ist ähnlich bei Windkraftanlagen. Auch hier sind üblicherweise überregional tätige Firmen mit der Wartung der Anlagen betraut oder es besteht ein Wartungsvertrag mit dem Produzenten der Windkraftanlagen, so dass die hierfür getätigten Auszahlungen nicht innerhalb der Region wirksam werden.

Eine solche regionale Wertschöpfung ist für die Realisierung eines Bioenergievorhabens von hoher Relevanz. In der Regel sind bei kleineren dezentralen angelegten Anlagen im Gegensatz zu größeren zentral organisierten Anlagen ortsansässige Firmen eingebunden, bei dem das Kapital in der Region verbleibt. Sowohl die dörfliche Bevölkerung als auch Landwirte haben eine hohe Präferenz für dezentrale Bioenergiekonzepte (Granoszewski & Spiller 2013; Wüste & Schmuck 2013; s. Kap. 3.8 3.7). Landwirte kritisieren zudem den Kapitalabfluss aus der Region. Insofern ist es aus Akzeptanzsicht von Anwohnern gegenüber einem Bioenergievorhaben und aus Gründen der Mitwirkungsbereitschaft von Landwirten als Biogasproduzenten bzw. Rohstofflieferanten wichtig, lokale Wirtschaftskreise anzuregen und zu schließen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Bioenergieprojekte in einem hohen Maße zur Stärkung regionaler Wirtschaftskreisläufe beitragen. Bereits in der Investitionsphase können viele Arbeiten regional vergeben werden. Diese fallen aber nur einmalig an. Im Unterschied zu Windkraft- oder PV-Anlagen werden aber für den laufenden Geschäftsbetrieb ständig Energieträger und Arbeitsleistungen benötigt, die zu dauerhaften Einkommen in der Region führen.

Literatur

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. Stand Febr. 2017. 45 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=12

Granoszewski, K. & Spiller, A. (2013). *Langfristige Rohstoffsicherung in der Supply Chain Biogas: Status Quo und Potenziale vertraglicher Zusammenarbeit.* Diskussionsbeitrag 1303 des Departments für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung der Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen. Gesichtet am 13.11.2013: http://www.uni-goettingen.de/de/document/download/ce15ca823155a0d9dc0c5f0a959e1dd0.pdf/Granoszewski_Spiller_2013__Diskussionsbeitrag_Biomasseliefervertr%C3%A4ge_FINAL.pdf

Ruppert, H., Eigner-Thiel, S., Girschner, W., Karpenstein-Machan, M., Roland, F., Ruwisch, V., Sauer, B., Schmuck, P. (2008). Das Bioenergiedorf – Voraussetzungen und Folgen einer eigenständigen Wärme- und Stromversorgung durch Biomasse für Landwirtschaft, Ökologie und Lebenskultur im ländlichen Raum. *Fortschritt neu denken* 1, 197 S. + 127 S. Anhang, Göttingen

Wüste, A. & Schmuck, P. (2013). Social Acceptance of Bioenergy Use and the Success Factors of Communal Bioenergy Projects. In: H. Ruppert, M. Kappas, & J. Ibendorf (Hrsg.) *Sustainable Bioenergy Production – An Integrated Approach*. S. 293-318. Dordrecht: Springer.

2.2.4 Wie kann ein regionales Konzept zur Nutzung von Wärme aus Biomasse wirtschaftlich vorteilhaft gestaltet werden?

Nico Michalak

Zielgruppen: Ingenieurbüros, interessierte Bürger, Anlagenbetreiber, Klimaschutzmanager, Regionalmanager, Landräte, Landkreisverwaltungen

Neben lokalen Ansätzen, die die Wirtschaftlichkeit von innerörtlichen Wärme- und Energiekonzepten überprüfen und optimieren sollen (s. Kap. 2.1.7), stellt sich die Frage, wie bereits bestehende oder geplante Biogasanlagen im regionalen Verbund eingesetzt werden können, zumal eine Vielzahl älterer Anlagen ohne Wärmekonzept betrieben werden. Aufgrund der Neuerungen im EEG, die eine Wärmenutzung von 60% bei neuen Biogasanlagen vorschreiben (ab EEG 2012), wird ein regionales Wärmenutzungskonzept ebenfalls interessant.

Ziel eines regional ausgerichteten Konzeptes ist es deshalb, bereits bestehende Wärmeproduktionsstandorte (z. B. realisierte oder geplante Biogasanlagen, Holzhackschnitzelheizwerke etc.) mit Wärmekunden also Wärmeabnehmern in der Region (öffentliche und private Großabnehmer, wie bspw. Schulzentren, Industriegebiete, Altenheime, Krankenhäuser oder Siedlungen mit bestehenden oder geplanten Nahwärmenetzen) ökonomisch sinnvoll zu verbinden. Dabei wird ebenfalls untersucht, ob existierende Produktionsstandorte erweitert werden sollen und/oder ob eventuell zusätzliche Standorte notwendig werden.

Während auf lokaler Ebene die Planung des Nahwärmenetzes (aufgrund einer Vielzahl von existierenden Verzweigungen und Alternativverläufen) sehr aufwändig sein kann (Daub et al. 2013), gestaltet sich auf regionaler Ebene insbesondere die Ermittlung des günstigsten Produktionssystems (aufgrund der Vielzahl der Anlagenkombinationen) als sehr komplex.

Auch wenn grundsätzlich verschiedene Arten von Technologien zum Einsatz kommen können, ist es mit Blick auf den zunehmenden Modellumfang allerdings sinnvoll, zunächst eine diesbezügliche Vorauswahl vorzunehmen. Auch hinsichtlich der Biomasseverfügbarkeit (s. Kap. 3.4) und damit der Größe der Anlagen sollten im Vorfeld der Modellierung geeignete Annahmen getroffen werden, unter Beachtung möglicher Nutzungskonflikte (Kap. 2.1.8). Der Wärmetransport erfolgt über Fernwärmenetze; hierfür wird ein fester Einspeisepunkt in das Nahwärmenetz des jeweiligen Wärmeabnehmers definiert.

Aufgrund der langen Nutzungsdauer der Investition wird im Rahmen einer ökonomischen Betrachtung als Entscheidungsgrundlage der Kapitalwert herangezogen (Kap. 2.1.7). Zu seiner Berechnung werden zunächst die Einzahlungen, die durch den Wärmeverkauf generiert werden, allen Auszahlungen gegenüber gestellt, die im Zuge der Errichtung von Verbindungsnetz und Produktionskomponenten

sowie ihres Betriebs anfallen. Dabei werden alle Zahlungen auf den Investitionszeitpunkt abgezinst.

Bestehen bereits Nahwärmenetze bei den einzelnen Bedarfsorten (z. B. Siedlungen, Industriegebiete), können die Kapitalwerte dieser Orte aggregiert in die regionale Gesamtbetrachtung einbezogen werden, ohne dass zwischen Einzahlungen und Auszahlungen explizit differenziert werden muss.

Bei der Auswahl der Wärmekunden kann unterschiedlich vorgegangen werden: So ist es einerseits möglich, dass das Modell vollständig „frei optimiert", d.h. dass der Anschluss eines potenziellen Wärmekunden an das Fernwärmenetz nur dann geplant wird, wenn dies wirtschaftlich vorteilhaft ist. Dies könnte im Ergebnis bedeuten, dass nicht alle Wärmekunden berücksichtigt werden. Andererseits kann im Modell über unterschiedliche Vorgaben eine Berücksichtigung sozialer und/oder ökologischer Aspekte erfolgen (Kap. 2.1.2), um für gewünschte Versorgungsstrukturen (z. B. Anbindung eines Schulzentrums, eines Freibades oder eine Ausgrenzung bestimmter Energieträger) die ökonomisch günstigste Variante zu ermitteln. Diese Ergebnisse bilden die Basis für Überlegungen zur Gestaltung einer regionalen Versorgungsstruktur und von regionalen Wertschöpfungsketten (Kap. 2.2.3).

Anwender eines derartigen regionalen Standortstrukturmodells können beispielsweise Stadtwerke, Regionalplaner oder auch ein regionaler Interessenverbund aus Wärmeabnehmern und -produzenten sein.

Literatur

Daub, A., Uhlemaier, H., Ruwisch, V. & Geldermann, J. (2013). Optimising Bioenergy Villages‘ Local Heat Supply Networks. In: Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J. (eds.): *Sustainable Bioenergy Production – An Integrated Approach.* S. 219-238. Springer. Dordrecht

EEG (2012). Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromeinspeisung aus Erneuerbaren Energien vom 28. Juli 2011, *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2011 Teil I Nr. 42*, Berlin

2.2.5 Synthese der Antworten aus den Schlüsselfragen zur Konfliktvermeidung bei Bioenergieproduktion und -nutzung auf Regionsebene

Jens Ibendorf

Die regionale Ebene ist die übergeordnete Steuerungs- und Handlungsebene, bei der die kumulierten Wirkungen der verschiedenen lokalen Aktivitäten ersichtlich werden. Hier müssen die unterschiedlichen Bioenergie-Einzelvorhaben in ein regionales erneuerbares Energienkonzept überführt und abgestimmt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die einzelnen lokalen Bioenergieaktivitäten mit den anderen erneuerbaren Energien-Aktivitäten (Wind- und Solarenergien) in einem regionalen Energieverbund zusammenspielen und nicht gegenseitig konkurrieren. Gleichzeitig ist auf der regionalen Ebene erkannbar, welche regionalen Auswirkungen die lokalen Bioenergieaktivitäten auf Natur und Landschaft haben. Auf der lokalen/betrieblichen Ebene sind diese kumulierten Wirkungen noch nicht erkennbar.

Bei der Integration der unterschiedlichen Energieformen in die regionalen Zukunftspläne sind die Nachhaltigkeitsprinzipien (siehe Kap. 1.3.2) ebenso zu beachten wie auf der lokalen Ebene. Haben wir es auf der lokalen Ebene schon mit vielfältigen Interessensgruppen zu tun, wird es auf der regionalen Ebene teilweise noch unübersichtlicher und komplizierter, diese Interessen unter einen Hut zu bringen. Demensprechend sind verschiedene Methoden anzuwenden, um einen Konsens zwischen den diversen Zielgruppen und Interessen zu ermöglichen. Folgende Punkte können als Erfolgsfaktoren eines regionalen Transformationsprozesses verstanden werden:

- Gemeinsame Generierung neuen Anwendungswissens mit Wissenschaft und Zivilgesellschaft, um die regionale Energieversorgung mit Hilfe der Bioenergie nachhaltig zu entwickeln
- Sicherstellung einer kontinuierlichen Beteiligung aller Interessensvertreter
- Gemeinsame Entwicklung einer langfristigen regionalen Vision
- Umsezung der Vision in konkrete Zielvorgaben (räumlich, zeitlich)
- Politische Legitimation durch Landrat und Kreistag, inklusive konkreter Umsetzungsbeschlüsse
- Einbindung der regionalen Verwaltung und Schaffung neuer Transformationsstrukturen innerhalb der Verwaltungen (ressortübergreifend)
- Kontinuierliche Evaluation des Entwicklungsprozesses
- Externe Moderation
- Konzentration auf lokale Leuchtturmprojekte, die die regionalen Zielvorgaben umsetzen

Das zyklische Nachhaltigkeitsmanagement hat sich in den letzten Jahren als geeignete Methodik entwickelt, die Anforderungen auf der regionalen Ebene systematisch zu bearbeiten (si. Kap. 2.2.1).

Eine systemische Verfahrensweise, um die verschiedenen Interessen räumlich und zeitlich abzubilden und deren mögliche Konflikte darzustellen, ist die Szenariomethode. Da der Energiepflanzenbau mit vielen anderen Nutzungsformen (Lebensmittel- und Futtermittelanbau, Naturschutz) konkurriert, ist es sinnvoll, eine raumbezogene Entwicklung des Energiepflanzenbaus im Rahmen verschiedener Szenarien abzubilden. Diese verschiedenen Szenarien müssen, wie oben beschrieben, mit den unterschiedlichen Interessensgruppen zusammen entwickelt und validiert werden. Damit werden die teilweise abstrakten Ziele in den regionalen Entwicklungsplänen räumlich verortet und mögliche Konfliktbereiche werden sichtbar. Diese Darstellungen ermöglichen dann im Zuge des weiteren Aushandlungsprozesses, mögliche Konflikte zu minimieren oder im Voraus zu unterbinden und in einem breiten Beteiligungsprozess konsensorientierte Lösungen zu finden. Diese Szenariomethode wurde hier im Bereich Natur- und Landschaftsschutz erfolgreich durchgeführt (siehe Kap. 2.2.2, 3.5).

Neben den sozialen und ökologischen Fragen, sind die ökonomischen Aspekte einer regionalen Bioenergieversorgung entscheidende Faktoren bei der Entwicklung. Gerade bei der Bioenergie ist die regionale Wertschöpfung hoch. In der Investitionsphase und während des laufenden Geschäftsbetriebes werden Investitionen getätigt, die vor allen Dingen lokalen und regionalen Unternehmen zu Gute kommen. Besonders die Landwirte provitieren entweder als Substratlieferant oder/ und als Biogasanlagenbetreiber von kleinen dezentralen Anlagen. Im Unterschied zu Windkraft- oder PV-Anlagen werden aber für den laufenden Geschäftsbetrieb ständig Energieträger und Arbeitsleistungen benötigt, die zu dauerhaften Einkommen in der Region führen.

Um die Effizienz der Biogasanlage zu steigern ist es notwendig, ein schlüssiges Wärmekonzept zu entwickeln. Viele bestehende Anlagen haben kein Wärmekonzept, da die Wärmeabnehmer nicht nah genug an den Anlagen sind. Ziel eines regional ausgerichteten Wärmekonzeptes ist es deshalb, bereits bestehende Wärmeproduktionsstandorte (z. B. realisierte oder geplante Biogasanlagen, Holzhackschnitzelheizwerke etc.) mit Wärmekunden, d.h. Wärmeabnehmern in der Region (öffentliche und private Großabnehmer, wie bspw. Schulzentren, Industriegebiete, Altenheime, Krankenhäuser oder Siedlungen mit bestehenden oder geplanten Nahwärmenetzen) ökonomisch sinnvoll zu verbinden. Die Modellierung mit den verschiedenen Anschlussmöglichkeiten bildet die Basis für Überlegungen zur Gestaltung einer regionalen Wärme-Versorgungsstruktur, welche von Statdtwerken, Regionalplanern oder auch ein regionaler Interessenverbund aus Wärmeabnehmern und -produzenten genutzt werden kann.

3 Ergebnisse der Teilprojekte

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte detaillierter dargestellt. Eine Übersicht der Teilprojekte und ihre Verknüpfung werden nochmals in Abbildung 3-0 gegeben.

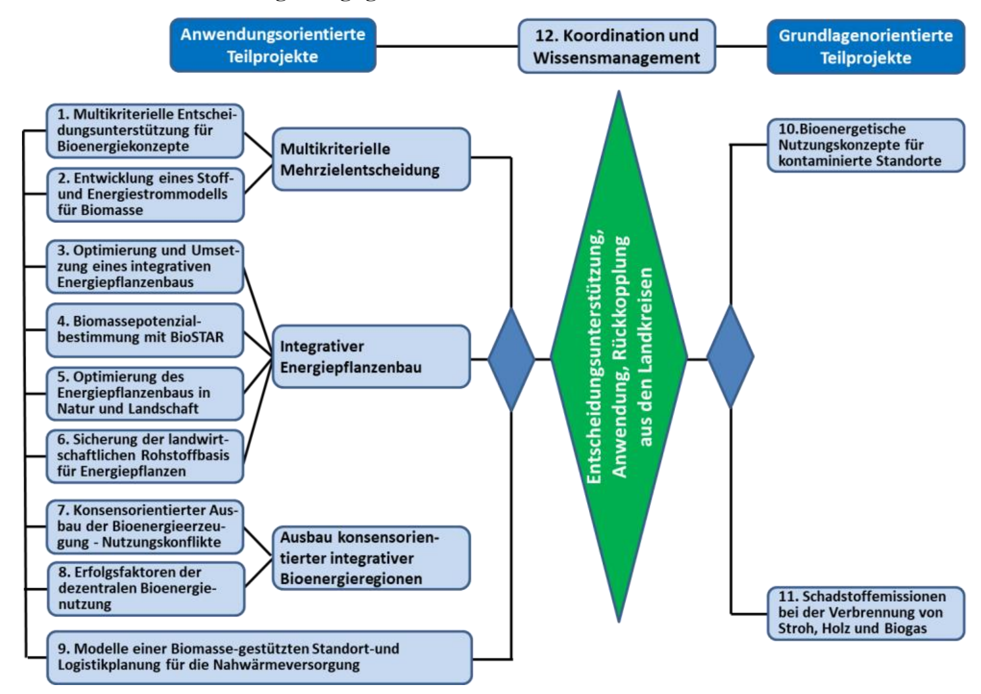


Abbildung 3-0: Schematische Darstellung der Teilprojekte und ihre Vernetzung im Forschungsverbundvorhaben „Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft“

Ergänzende Informationen vorwiegend aus der ersten Projektphase sind zu lesen im Buch *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach* (Ruppert et al. 2013)

Literatur

Ruppert, H.; Kappas, M. & Ibendorf, J (Hrsg., 2013). *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach*. Springer-Verl., Dordrecht; 451 S.; ISBN: 978-94-007-6641-9.

3.1 Multikriterielle Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl von Bioenergienutzungskonzepten

Nils Lerche, Swantje Eigner-Thiel, Meike Schmehl, Jutta Geldermann

3.1.1 Problembeschreibung

Die energetische Nutzung von Biomasse weist gegenüber den anderen erneuerbaren Energien die Vorteile auf, dass sie flexibel zur Herstellung verschiedener Produkte (Strom, Wärme, Kälte und sogar Kraftstoffe) einsetzbar und speicherbar ist. Ungeachtet dieser positiven Aspekte der energetischen Biomassenutzung existieren jedoch auch Bedenken hinsichtlich einer intensiveren Nutzung. Beispielsweise wird kritisiert, dass der verstärkte Einsatz von Biomasse als Energieträger zu einer Ausweitung von Maismonokulturen geführt hat mit negativen Auswirkungen auf die Biodiversität. Aus wirtschaftlicher Sicht ist der vorteilhafte Betrieb von Biogasanlagen noch auf Subventionen angewiesen. Weiterhin kann festgestellt werden, dass die Akzeptanz der lokalen Bevölkerung abnimmt und intensiv diskutiert wird, ob die Nutzung potenzieller Nahrungsmittel zur Energieerzeugung ethisch vertretbar ist.

Anhand der beispielhaft aufgeführten Kritikpunkte wird deutlich, dass ein nachhaltiges Konzept zur energetischen Nutzung von Biomasse eine Vielfalt an Anforderungen beachten sollte. Da damit ein Entscheidungsproblem mit zahlreichen Kriterien, die teilweise zueinander im Zielkonflikt stehen, betrachtet wird und die aktive Einbeziehung der lokalen Bevölkerung und der Entscheidungsträger gezielt verstärkt werden soll, werden Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (MCDA, „**M**ulti**C**riteria **D**ecision **A**nalysis“) als ein vielversprechendes Instrument angesehen.

In diesem Teilprojekt wird daher geprüft, inwieweit Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung angewendet werden können, welche Herausforderungen in dem untersuchten Kontext von Bedeutung sind und welche Kriterien für eine nachhaltige energetische Nutzung von Biomasse berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren werden Werkzeuge entwickelt, die eine zukünftige Anwendung von MCDA-Methoden zur Entscheidungsunterstützung über das Projektende hinaus ermöglichen.

3.1.2 Methoden

Für die Umsetzung der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung zur Identifikation von nachhaltigen Biomassenutzungskonzepten wurde die Methode *PROMETHEE* (Preference Ranking Organization MEthod for Enrichment Evaluation) angewendet. Um die Eignung der Methode zu prüfen, wurden eine exemplari-

sche Anwendung im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführt und eine umfassende Recherche zur Ermittlung relevanter Kriterien und deren Berechnung vorgenommen.

3.1.2.1 *Multikriterielle Entscheidungsunterstützung und die Auswahl der Methode PROMETHEE*

Bei Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung bzw. MCDA-Methoden werden mehrere diskrete Alternativen anhand von mindestens zwei Kriterien auf Basis der subjektiven Präferenzen eines oder mehrerer Entscheidungsträger bewertet (Belton & Stewart 2002). Sie ermöglichen somit, mehrere Ziele gleichzeitig zu berücksichtigen, wobei quantitative und qualitative Kriterien einbezogen werden können. Dies ist für eine Nachhaltigkeitsbewertung von großem Nutzen. Die Ziele der Anwendung von MCDA-Methoden liegen zum einen darin, eine Empfehlung hinsichtlich der zu wählenden Alternative auszusprechen, eine Rangfolge für die untersuchten Alternativen zu ermitteln oder eine Sortierung vorzunehmen (Roy 1996). Weiterhin sollen durch die strukturierte Aufbereitung des Entscheidungsprozesses zusätzliche Informationen generiert sowie ein besseres Verständnis bei allen Beteiligten für das Entscheidungsproblem als Ganzes geschaffen werden (Figueira et al. 2005; Belton & Stewart 2002). Weiterer positive Effekte sind die steigende Transparenz der Entscheidung und die mögliche Partizipation betroffener Zielgruppen.

Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich MCDA-Methoden zur Unterstützung bei Entscheidungen zur Auswahl eines Energieversorgungskonzepts, da hierbei mehrere Kriterien berücksichtigt werden müssen und eine aktive Beteiligung der Bevölkerung die Akzeptanz für Projekte, z.B. für die Errichtung von Biogasanlagen, erhöhen kann. Daher werden MCDA-Methoden häufig zur Entscheidungsunterstützung bei Projekten hinsichtlich der Energieversorgung eingesetzt (Pohekar & Ramachandran 2004; Wang et al. 2009).

Bei MCDA-Methoden wird zwischen Methoden des ‚Multi Attribute Decision Making' (MADM) und des ‚Multi Objective Decision Making' (MODM) unterschieden (Zimmermann & Gutsche 1991). In diesem Teilprojekt soll eine der MADM-Methoden angewendet werden. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass eine diskrete Menge an vorher bekannten Alternativen anhand der ermittelten Kriterien bewertet werden soll (Belton & Stewart 2002; Zimmermann & Gutsche 1991). Bei MADM-Methoden steht zudem der beschriebene Gedanke der Entscheidungsunterstützung im Vordergrund, sodass die Generierung zusätzlicher Informationen sowie die Strukturierung des Problems und des Entscheidungsprozesses angestrebt werden. Darüber hinaus können bei MADM-Methoden die Kriterien auf unterschiedlichen Skalenebenen definiert werden. Hierdurch können qualitative Kriterien gut einbezogen werden. So können die Kriterienausprägungen zum einen auf einer Nominalskala angegeben werden, wobei qualitative Daten klassifiziert werden, z.B. die Art des Substrats. Zum anderen ist die Angabe auf

einer Ordinalskala möglich. Dies bedeutet, dass eine Aussage in Form einer Rangordnung vorgenommen wird. Die Anwendung einer Ordinalskala wäre z.B. zur Messung der Akzeptanz denkbar. Des Weiteren kann eine Kardinalskala angesetzt werden. Auf dieser werden nicht nur die Rangfolge, sondern auch die konkreten Abstände zwischen den Ausprägungen gemessen. Ein Beispiel hierfür ist die Menge an ausgestoßenen Emissionen in CO_2-Äquivalenten. Im Rahmen dieses Teilprojekts wird die Anwendung von MADM-Methoden daher als geeignet erachtet, da eine Entscheidungsunterstützung hinsichtlich vorherig klar definierter Alternativen durchgeführt werden soll, wobei auch qualitative Kriterien berücksichtigt werden müssen.

Der strukturierte Entscheidungsprozess der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung, veranschaulicht in Abbildung 3-1, verläuft hierbei in mehreren Schritten, zwischen denen jedoch eine iterative Rückkopplung besteht (Belton & Stewart, 2002). Somit können aufgrund gewonnener Erkenntnisse die Angaben aus vorherigen Schritten angepasst werden, sodass keine stringente Reihenfolge der Schritte vorliegt. Beim Entscheidungsprozess wird zwischen dem Analysten, dem Entscheidungsträger und den Interessengruppen unterschieden (Belton & Stewart, 2002). Der Analyst unterstützt den Entscheidungsträger und die Interessensgruppen, indem er oder sie durch den Entscheidungsprozess führt und die korrekte Anwendung der Methode sicherstellt. Der Entscheidungsträger und die Interessensgruppen lassen ihre jeweiligen Präferenzen einfließen und erzielen somit ein Ergebnis, mit dessen Hilfe der Entscheidungsträger letztendlich eine fundierte Entscheidung treffen soll.

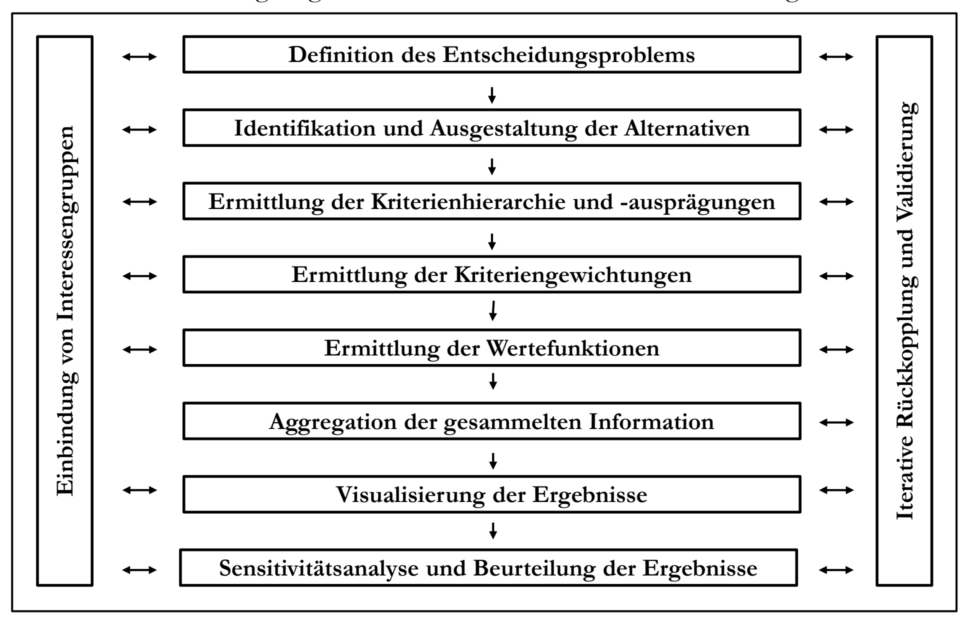


Abbildung 3-1: Schritte im Rahmen der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung

Im Rahmen des Entscheidungsprozesses wird zunächst das Entscheidungsproblem definiert, indem das Oberziel (z.B. Ermittlung eines Bioenergiekonzeptes), die betroffenen Interessensgruppen, der Entscheidungsträger sowie der zeitliche Horizont festgelegt werden. Anschließend werden die potenziellen Alternativen sowie die relevanten Bewertungskriterien zusammen mit dem Entscheidungsträger und den Interessensgruppen ermittelt. Darauf aufbauend werden für sämtliche Alternativen die jeweiligen Ausprägungen bezüglich der einzelnen Kriterien ermittelt. Dies kann über verschiedene Quellen geschehen, wie z.B. Expertenbefragungen, Berechnungen oder Umfragen. Die einzelnen Kriterien werden durch die Entscheidungsträger oder die Interessensgruppen gewichtet und den einzelnen Kriterien Funktionen (Nutzen- oder Präferenzfunktion) zugeordnet. Sämtliche Informationen können in einer Entscheidungsmatrix zusammengefasst werden, wie sie in Tabelle 3-1 dargestellt wird. Anschließend erfolgt eine Aggregation der gesammelten Informationen über die Anwendung der gewählten Methode, um abschließend unter Berücksichtigung der Erkenntnisse einer Sensitivitätsanalyse die erzielten Ergebnisse zu beurteilen.

Tabelle 3-1: Beispielhafte Entscheidungsmatrix

Kriterium	Gewicht	Alternativen		
		Biogas-großanlage	Bioenergie-dorf	Biogaseinzel-hofanlage
Versauerungspotenzial (SO_2-Äq./ha) → Min	35 %	67,00	37,35	45,00
Kapitalwert (€) → Max	25 %	10 982 518	2 950 418	1 763 107
Partizipation Planung (Punkten) → Max	40 %	2	5	1

Als MADM-Methode zur Aggregation der Informationen wurde PROMETHEE gewählt (Brans et al. 1986). Die Wahl liegt darin begründet, dass PROMETHEE ein sogenanntes Outranking-Verfahren ist und somit einen nicht vollständig kompensierenden Ansatz darstellt. Dies bedeutet, dass schlechte Ausprägungen hinsichtlich eines Kriteriums nicht vollständig durch bessere Ausprägungen in einem anderen Kriterium ausgeglichen werden. Diese Eigenschaft ist insbesondere bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Bedeutung. Des Weiteren sind die Transparenz und die gute Verständlichkeit besondere Vorteile der Methodik, da zu erwarten ist, dass die Entscheidungsträger im Rahmen dieses Projektes in der Anwendung von MADM-Methoden ungeübt sind. Zudem ermöglicht PROMETHEE eine realistische Abbildung der Präferenzen des Entscheidungsträgers und liefert hierdurch weitere Erkenntnisse im Sinne der Entscheidungsunterstützung (Geldermann 1999; Omann 2004).

PROMETHEE

(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)

Entscheidungsproblem:

$A := \{a_{1,} \dots, a_J\}: Menge\ der\ diskreten\ Alternativen\ a_j\ (j = 1, \dots, J)$

$F := \{f_{1,} \dots, f_K\}: Menge\ der\ \ Kriterien\ f_k\ (k = 1, \dots, K)$

Zielerreichungs-/ Entscheidungsmatrix *X:*

$$X = \begin{bmatrix} f_1(a_1) & \cdots & f_K(a_1) \\ \vdots & f_k(a_j) & \vdots \\ f_1(a_n) & \cdots & f_K(a_n) \end{bmatrix}$$

$f_k(a_j)$ ist der Zielerreichungsgrad, den Alternative *j* für Kriterium *k* aufweist.

Schrittweiser Ablauf von PROMETHEE:

1. **Wahl einer Präferenzfunktion $p_k(d)$ für jedes Kriterium *k***

Die Präferenzfunktion $p_k(d)$ wird in Abhängigkeit von der Differenz *d* angegeben. Diese ergibt sich aus der Differenz der Kriterienausprägungen der Alternativen a_j und $a_{j'}$ hinsichtlich des Kriteriums *k*:

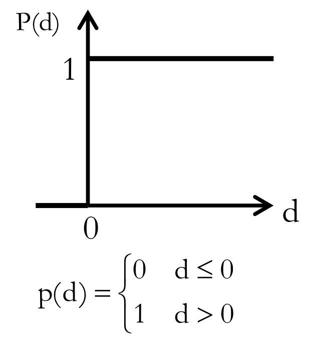
$$d = f_k(a_j) - f_k(a_{j'})$$

Zur Wahl der Präferenzfunktion stehen sechs verallgemeinerte Präferenzfunktionen zur Verfügung. Diese ordnen der Differenz einen Präferenzwert $p_k(a_j,a_{j'})$ zu. Der Präferenzwert gibt an, mit welcher Intensität Alternative a_j die Alternative $a_{j'}$ dominiert:

$$p_k(a_j, a_{j'}) = p_k(f_k(a_j) - f_k(a_{j'})) = p_k(d) \in [0, 1]$$

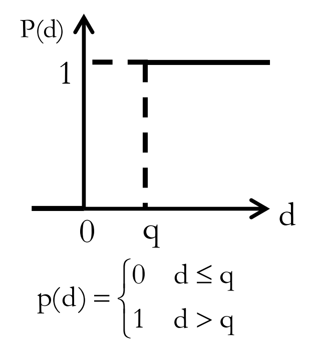
Bei einem Präferenzwert von 1 liegt strikte Präferenz vor, bei 0 Indifferenz und bei einem Wert zwischen 0 und 1 wird von schwacher Präferenz gesprochen.
Zur Definition der sechs typischen Präferenzfunktionen werden Schwellenwerte einbezogen. Der **Indifferenz-Schwellenwert *q*** gibt an, bis zu welcher Differenz hinsichtlich des betrachteten Kriteriums zwischen den Alternativen noch Indifferenz vorherrscht. Dies bedeutet, dass bis zu diesem Wert Unterschiede nicht relevant sind. Der **Präferenz-Schwellenwert *p*** gibt an, ab welchem Wert strikte Präferenz vorliegt. Das heißt, dass Differenzen, die größer als dieser Wert sind, zu einer strikten Bevorzugung führen. Der Parameter ***σ*** wird zur Festlegung des Wendepunktes der Präferenzfunktion angewendet, falls das Gauß'sche Kriterium angewendet wird.

Typ 1*:* Gewöhnliches Kriterium



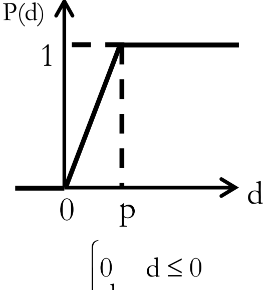
$$p(d) = \begin{cases} 0 & d \le 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$$

Typ 2: Quasi-Kriterium



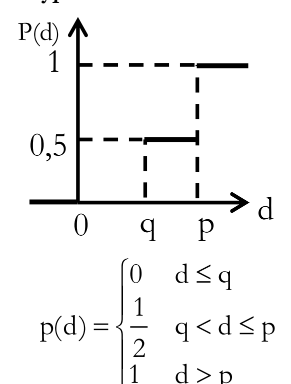
$$p(d) = \begin{cases} 0 & d \le q \\ 1 & d > q \end{cases}$$

Typ 3: Kriterium mit linearer Präferenz



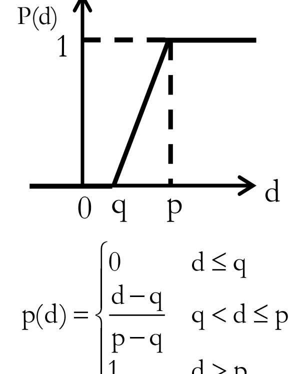
$$p(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$$

Typ 4: Stufen-Kriterium



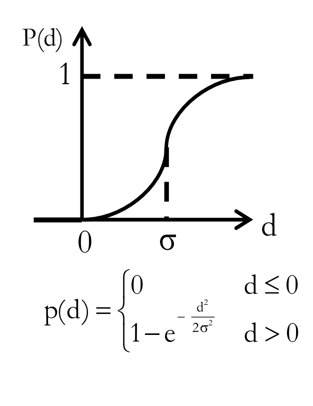
$$p(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$$

Typ 5: Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenzbereich



$$p(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$$

Typ 6: Gauß´sches Kriterium



$$p(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} & d > 0 \end{cases}$$

2. Festlegung des Kriteriengewichtungsvektors w^T

Der Entscheider gewichtet die Kriterien entsprechend seiner subjektiven Präferenzen. Hierfür wird jedem Kriterium ein Punkt- bzw. Prozentwert zugeordnet, sodass sich in Summe 100 Punkte bzw. 100 % ergeben:

$$\boldsymbol{w^T} = [\boldsymbol{w_1}, \ldots, \boldsymbol{w_K}] \quad \textbf{mit}$$

$$\sum_{\boldsymbol{k=1}}^{\boldsymbol{K}} \boldsymbol{w_k} = \mathbf{100}\ \boldsymbol{Punkte}\ bzw.\ \mathbf{100}\ \%$$

Für die Erhebung der subjektiven Gewichtung stehen verschiedene Verfahren (z.B. SMART, SWING, SIMOS) zur Verfügung.

3. Ermittlung der Outranking-Relationen π für jedes Alternativenpaar

Für jede Alternative a_j wird gegenüber sämtlichen weiteren Alternativen $a_{j'}$ die Outranking-Relation $\pi(a_j,a_{j'})$ ermittelt. Hierüber wird die Präferenz von Alternative a_j gegenüber $a_{j'}$ ausgedrückt, bei Berücksichtigung sämtlicher Kriterien. Die Outranking-Relation ergibt sich aus dem gewichteten Mittel der Präferenzwerte über alle Kriterien:

$$\pi(a_j, a_{j'}) = \sum_{k=1}^{K} w_k \cdot p_k(d)$$

4. Ermittlung des Ausgangsflusses Φ⁺ für jede Alternative a_j

Auf Basis der Outranking-Relationen kann als Maß der Stärke einer Alternative der Ausgangsfluss Φ^+ bestimmt werden. Dieser gibt an, wie stark eine Alternative gegenüber sämtlichen weiteren Alternativen präferiert wird. Er ergibt sich aus der Summe aller Outranking-Relationen, in denen angegeben wird, inwieweit Alternative a_j die Alternativen $a_{j'}$ dominiert:

$$\Phi^+(a_j) = \frac{1}{J-1} \sum_{j'=1}^{J} \pi(a_j, a_{j'})$$

5. Ermittlung des Eingangsflusses Φ⁻ für jede Alternative a_j

Der Eingangsfluss Φ^- gibt hingegen an, wie stark eine Alternative selbst durch die weiteren Alternativen dominiert wird. Er ergibt sich aus der Summe aller Outranking-Relationen, in denen angegeben wird, inwieweit Alternative a_j durch die Alternativen $a_{j'}$ dominiert wird:

$$\Phi^-(a_j) = \frac{1}{J-1} \sum_{j'=1}^{J} \pi(a_{j'}, a_j)$$

6. Ermittlung der partiellen Präordnung nach PROMETHEE I

Anhand der Aus- und Eingangsflüsse kann eine partielle Präordnung erstellt werden, um die relative Vorteilhaftigkeit der Alternativen zu bestimmen. Über die partielle Präordnung ist es zudem möglich, Unvergleichbarkeiten abzubilden.
Für die Ermittlung der Präferenzordnung auf Basis der Ausgangsflüsse Φ^+ (Präferenz: P^+; Indifferenz: I^+) gilt:

$$a_j P^+ a_{j'}, wenn\ \Phi^+(a_j) > \Phi^+(a_{j'})$$

$$\boldsymbol{a_j I^+ a_{j'}}, \boldsymbol{wenn}\ \boldsymbol{\Phi^+(a_j) = \Phi^+(a_{j'})}$$

Für die Ermittlung der Präferenzordnung auf Basis der Eingangsflüsse Φ^- (Präferenz: P^-; Indifferenz: I^-) gilt:

$$\boldsymbol{a_j P^- a_{j'}}, \boldsymbol{wenn}\ \boldsymbol{\Phi^-(a_j) < \Phi^+(a_{j'})}$$

$$\boldsymbol{a_j I^- a_{j'}}, \boldsymbol{wenn}\ \boldsymbol{\Phi^-(a_j) = \Phi^+(a_{j'})}$$

Anhand der Präferenzordnungen von Aus- und Eingangsflüssen kann schließlich eine partielle Präordnung (Präferenz: P; Indifferenz: I; Unvergleichbarkeit: R) zur Darstellung der relativen Vorteilhaftigkeit erstellt werden:

$$\boldsymbol{a_j P a_{j'}}, wenn\ (\boldsymbol{a_j P^+ a_{j'}}\ und\ \boldsymbol{a_j P^- a_{j'}})$$

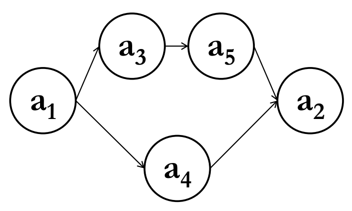
$$oder\ (\boldsymbol{a_j P^+ a_{j'}}\ und\ \boldsymbol{a_j I^- a_{j'}})$$

$$oder\ (\boldsymbol{a_j I^+ a_{j'}}\ und\ \boldsymbol{a_j P^- a_{j'}})$$

$$\boldsymbol{a_j I a_{j'}}, wenn\ (\boldsymbol{a_j I^+ a_{j'}}\ und\ \boldsymbol{a_j I^- a_{j'}})$$

$$\boldsymbol{a_j R a_{j'}}, wenn\ nicht\ (\boldsymbol{a_j P a_{j'}}\ und\ nicht\ \boldsymbol{a_j I a_{j'}})$$

Die partielle Präordnung wird graphisch veranschaulicht, indem über gerichtete Kanten abgebildet wird, ob eine Alternative eine andere dominiert. Existiert zwischen zwei Alternativen keine Kante, so liegt Unvergleichbarkeit vor. Beispielsweise:



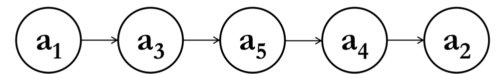
In diesem Fall sind die Alternativen a_3 und a_5 unvergleichbar mit Alternative a_4, jedoch wird Alternative a_3 gegenüber Alternative a_5 präferiert. Die Ordnung ist hierbei transitiv.

7. Ermittlung der Totalordnung nach PROMETHEE II

Die Totalordnung kann über den Nettofluss ermittelt werden. Dieser resultiert aus der Differenz von Aus- und Eingangsfluss einer Alternative:

$$\boldsymbol{\Phi^{net}(a_j) = \Phi^+(a_j) - \Phi^-(a_j)}$$

Die Totalordnung ist eine eindeutige Rangfolge, in der keine Unvergleichbarkeiten vorliegen. Ein größerer Nettofluss führt zu Präferenz. Beispielsweise:



Zur Ergebnisaufbereitung empfiehlt es sich, sowohl die partielle Präordnung als auch die Totalordnung anzugeben.

Die Vorbereitung und strukturierte Durchführung einer multikriteriellen Entscheidungsunterstützung mit mehreren Akteuren und verschiedenen Interessensgruppen ist ein komplexer Prozess, der einige Anforderungen an den Analysten stellt. Daher ist diesem Teil der Anwendung von MCDA-Methoden, insbesondere hinsichtlich der damit einhergehenden sozialen Begleitprozesse, ein eigenes Teilprojekt (siehe Kap. 3.8) gewidmet.

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden auch methodische Erweiterungen identifiziert, die im Kontext der betrachteten Fragestellung von Bedeutung sind. So wird ein Ansatz entwickelt, mit dem die Datenqualität der eingehenden Informationen bewertet wird und der in die bestehende Promethee-Methode integrierbar ist. Weiterhin wird untersucht, inwieweit die Einbeziehung geeigneter Referenzpunkte in PROMETHEE eine geeignetere Bewertung hinsichtlich Nachhaltigkeit ermöglicht (Lerche & Geldermann 2015a; Lerche 2016). Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse hinsichtlich einer potenziellen methodischen Erweiterung und der Integration von Referenzpunkten wurden zudem auf internationalen Konferenzen vorgestellt (Lerche et al. 2012; Lerche 2013; Lerche & Geldermann 2015b; Lerche et al. 2015).

3.1.2.2 *Exemplarische Anwendung der Mehrzielentscheidungsunterstützung*

Im Fokus der ersten Projektphase von 2009 bis 2012 stand die exemplarische Anwendung von PROMETHEE zur Entscheidungsunterstützung hinsichtlich verschiedener potenzieller Bioenergiekonzepte. Hierdurch sollte einerseits die Methode auf Anwendbarkeit und potenzielle Herausforderungen geprüft werden, andererseits sollten wissenschaftliche Erkenntnisse bezüglich relevanter Kriterien einer nachhaltigen Bioenergienutzung erzielt werden.

Als Problem, für das eine beispielhafte Entscheidungsunterstützung durchgeführt werden sollte, wurde die Identifikation eines nachhaltigen regionalen Bioenergiekonzeptes gewählt. Anschließend wurden drei potenzielle Alternativen, ein Bioenergiedorf, eine Biogasgroßanlage mit Aufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz und eine Biogaseinzelhofanlage, definiert. Die Grundlage für die Aufstellung der Daten zur Alternativenausgestaltung stellten hierbei das Bioenergiedorf Jühnde im Landkreis Göttingen sowie eine Biogasgroßanlage und eine Einzelhofanlage, jeweils aus dem Raum Südniedersachsen, dar.

In einem nächsten Schritt wurden die Kriterien zur Bewertung der einzelnen Biomassenutzungskonzepte hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit aufgestellt. Grundlage hierfür stellen die drei Nachhaltigkeitsdimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales dar (UNCED 1992), die zudem um eine technische Dimension erweitert wurden. Die Überführung der Nachhaltigkeitsziele in Kriterien für eine nachhaltige energetische Nutzung von Biomasse wurde interdisziplinär im Rahmen von Projektsitzungen vorgenommen. Hierdurch konnte das vorhandene Wissen von mehreren Experten aus verschiedenen Fachbereichen in einer Kriterienhierarchie gesammelt werden. Für die erhaltenen Kriterien wurden zudem die jeweiligen Ausprägungen der einzelnen Alternativen ermittelt. Hierfür wurde zum einen eine Software wie ‚Umberto' eingesetzt, um eine ökobilanzielle Bewertung vorzunehmen. Zum anderen wurde für weitere ökologische Kriterien, z.B. die Biodiversität, auf das Expertenwissen aus dem hier beschriebenen Gesamtprojekt ‚Bioenergie im Spannungsfeld' zurückgegriffen, um ein geeignetes Attribut zur Messung zu identifizieren sowie einen Wert für die einzelnen Alternativen anzusetzen. Zur Festlegung der Ausprägungen der sozialen Kriterien konnten Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt zum Bioenergiedorf Jühnde (vgl. Eigner-Thiel 2005) sowie Ergebnisse von Umfragen gemäß Kap. 3.8 verwendet werden. Generell bestätigte sich jedoch, dass die Datenerhebung und -aufbereitung aufwändig ist. Die Kriterien wurden zusätzlich im Rahmen der interdisziplinären Projektsitzungen von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gewichtet. Durch den Gewichtungsprozess wurde deutlich, dass aufgrund der vielen Kriterien tendenziell unterschiedliche Schwerpunkte von den verschiedenen Expertengruppen gesetzt werden.

Anschließend wurden die gesammelten Daten aufbereitet und mit Hilfe des PROMETHEE-Algorithmus zu einem Gesamtergebnis aggregiert. Die exemplarische Anwendung im Rahmen der Projektgruppe führte hierbei zum einen zu der Erkenntnis, dass die strukturierte Aufbereitung des Problems zur Erschließung neuer Perspektiven führt. Hierdurch konnte ein besseres Verständnis der relevanten Aspekte hinsichtlich der Nachhaltigkeitsbewertung geschaffen werden. Weiterhin liegt in der Ermittlung einer konsistenten Datengrundlage für den Vergleich von Alternativen eine große Herausforderung für die Praxis.

Die erhaltenen Erkenntnisse bezüglich relevanter Kriterien und der Erhebung ihrer Ausprägungen wurden auf verschiedenen Konferenzen sowie in mehreren Buchbeiträgen publiziert (Eigner-Thiel et al. 2012; Eigner-Thiel et al. 2013; Schmehl et al. 2010). Sie stellen zudem die Basis für die beispielhafte Kriterienhierarchie in Tabelle 3-2 dar.

3.1.2.3 *Erkenntnisse aus der exemplarischen Anwendung*

In der zweiten Projektphase von 2012 bis 2014 wurden auf Basis der bestehenden Erkenntnisse Produkte identifiziert und entwickelt, die es ermöglichen sollen, die Ergebnisse des Teilprojekts auch zukünftig verfügbar zu machen. So wurde entschieden, eine geeignete frei zugängliche Software zu entwickeln, da computergestützte Anwendungen zur Durchführung von MCDA-Methoden notwendig sind.

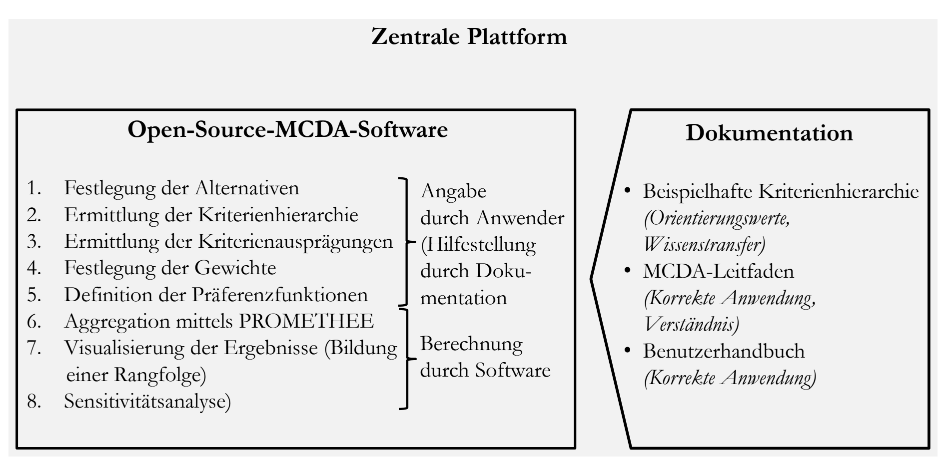


Abbildung 3-2: Produkte zur Zielerreichung

Ferner sollten Informationen für zukünftige Entscheidungsunterstützungsprozesse bereitgestellt werden, die eine adäquate Durchführung ermöglichen. Dazu wurden verschiedene Dokumentationen erstellt, die eine korrekte Anwendung der Methode sowie der Software sicherstellen sollen. Um auch die thematischen Erkenntnisse des Projekts zukünftig verfügbar zu halten, erschien es sinnvoll, die exemplarische Kriterienhierarchie als Orientierungshilfe bereitzustellen. Die identifizierten Produkte zur Erreichung der genannten Ziele sind in Abbildung 3-2 aufgeführt.

3.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse und Produkte, anhand derer ein Wissenstransfer der gewonnenen Erkenntnisse sowie die Anwendung von PROMETHEE zur Entscheidungsunterstützung ermöglicht werden, sind die Open-Source-MCDA-Software, die entwickelte Kriterienhierarchie und der konzipierte MCDA-Leitfaden zur computergestützten Durchführung einer multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (Geldermann & Lerche 2014). Die Software richtet sich dabei primär an erfahrene Analysten als Zielgruppe. Darüber hinaus ist jedoch auch, insbesondere durch die zur Verfügung gestellte Dokumentation, eine Nutzung durch interessierte Anwender möglich.

3.1.3.1 Bereitstellung der Open-Source-MCDA-Software

Die MCDA-Software wurde auf Basis der Programmiersprache JAVA entwickelt. Als zentrale Plattform zur Bereitstellung der Software und der unterstützenden Dokumentation wurde die Homepage der Professur für Produktion und Logistik der Georg-August-Universität Göttingen gewählt. Grund hierfür ist, dass eine entsprechende Pflege der Software sowie der Dokumente auch über das Projektende hinaus gewährleistet werden kann.

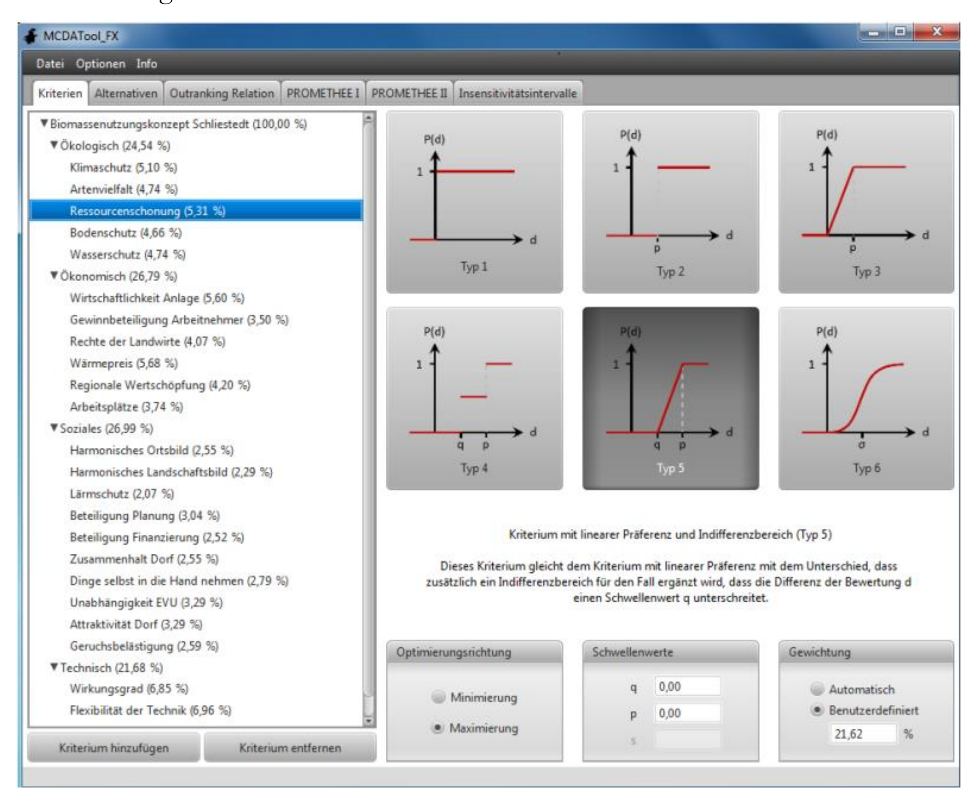


Abbildung 3-3: Screenshot Open-Source-MCDA-Software

Da bei der Anwendung der MCDA-Methode aufgrund der vielen Alternativen und Kriterien eine Menge an Informationen berücksichtigt und ausgewertet werden muss, wird die Berechnung in der Regel computergestützt vorgenommen, sodass die Bereitstellung und Anwendung einer geeigneten Software nötig ist. Zwar existiert bereits kostenlos verfügbare Software wie Web-HIPRE (Mustojaki & Hämäläinen 2000), jedoch stellt diese nicht die Methode PROMETHEE bereit. Weiterhin bietet keine bestehende Software eine flexible Gestaltung der Kriterienhierarchie, die für eine vielfältige Anwendung vorteilhaft erscheint. So werden eine nachträgliche Aufnahme beziehungsweise Streichung von Kriterien erlaubt sowie Anpassungen der gewählten Präferenzfunktionen und deren Schwellenwerte er-

möglicht. Dies ist insbesondere hinsichtlich der Nutzung der in der ersten Projektphase entwickelten Kriterienhierarchie von großem Nutzen. Bei einer interaktiven Anwendung der Software mit den Entscheidungsträgern werden somit situationsspezifische Anpassungen ermöglicht.

Um den Gedanken der Partizipation über das Projekt hinaus zu tragen, wurde sich zudem für die Entwicklung einer Open-Source-Software entschieden. Hierdurch wird ermöglicht, weitere Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung einzubinden, beziehungsweise die bestehende Software individuell den persönlichen Anforderungen anzupassen (Geldermann 1999; Geldermann 2006). Da die Software zudem kostenlos angeboten wird, wird sie bereits von Studenten im Rahmen ihres Studiums genutzt.

Darüber hinaus weist die Software gegenüber den bestehenden Software-Anwendungen den Vorteil auf, dass sie nicht nur in Englisch, sondern auch in Deutsch zur Verfügung steht. Hierdurch wird eine bessere Verständlichkeit für eine breitere Bevölkerungsschicht gewährleistet, und die Software kann bei potenziellen Bioenergiedorfprojekten in Deutschland gut angewendet werden.

Die Software ist so konstruiert, dass sie den Anwender durch die einzelnen Schritte des strukturierten Entscheidungsprozesses führt und hierbei stets eine iterative Anpassung erlaubt. Durch diese flexible Ausgestaltung kann ein interaktiver Prozess zwischen Analyst und Entscheidungsträgern stattfinden. Die Abfolge der Registerkarten ist dem strukturierten Entscheidungsprozess nachempfunden (siehe Abbildung 3-3).

Die ersten fünf Schritte des Entscheidungsprozesses werden hierbei durch die ersten beiden Registerkarten „Kriterien" und „Alternativen" abgedeckt. An dieser Stelle werden Angaben vom Entscheidungsträger benötigt, wobei sich zur Ermittlung der Daten die unterstützende Anwendung der Dokumentation in Form der Kriterienhierarchie sowie des MCDA-Leitfadens anbietet. So werden durch den Anwender die Alternativen, die Kriterien, die Kriterienausprägungen und -gewichte sowie die Ausgestaltung der Präferenzfunktion festgelegt. Für die Festlegung der Präferenzfunktionen wird zum besseren Verständnis eine kurze Erläuterung der Schwellenwerte aufgeführt.

Auf Basis der Informationen des Anwenders wird über die weiteren Registerkarten die Berechnung des Ergebnisses sowie dessen Visualisierung durchgeführt. Dies geschieht automatisch und wird durch die Software bereitgestellt, sodass kein weiterer Input seitens des Anwenders benötigt wird. Zur Aufbereitung der Ergebnisse wird die erzielte Rangfolge als partielle Präordnung (PROMETHEE I) und als Totalordnung (PROMETHEE II) dargestellt. Die partielle Präordnung erlaubt Unvergleichbarkeiten, wohingegen die Totalordnung eine eindeutige Rangfolge darstellt. Die der Rangfolge zugrundeliegenden Größen, wie Outranking-Relationen, Eingangsflüsse und Ausgangsflüsse, werden zusätzlich aufgeführt, um die einzelnen Berechnungsschritte transparent und nachvollziehbar zu gestalten.

Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsanalyse in Form von Insensitivitätsintervallen eingebaut (Geldermann, 1999). Hierdurch werden eine Überprüfung der Stabi-

lität der Lösung sowie eine Identifikation sensitiver Kriterien ermöglicht. Aufgrund der flexiblen Gestaltung der Software bieten die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse eine gute Möglichkeit, die erzielten Ergebnisse sowie die getroffenen Annahmen und Präferenzen und deren Auswirkungen detaillierter zu analysieren. So können z.B. angesetzte Kriterienausprägungen flexibel geändert und sogleich das neue Ergebnis visualisiert werden.

Die Validierung der Software erfolgte in Zusammenarbeit mit einem anderen Teilprojekt (siehe Kap. 3.8) im Rahmen einer praktischen Umsetzung in einem niedersächsischen Dorf. So wurden die Informationen, die in dem Teilprojekt mittels eines Workshops vor Ort ermittelt wurden, in die Open-Source-MCDA-Software eingepflegt und für die Berechnung genutzt. Zudem wurden die erhaltenen Visualisierungen zur Ergebnispräsentation verwendet.

Um eine korrekte Anwendung zu gewährleisten, wird zudem eine Gebrauchsanleitung für die Software bereitgestellt. Darin werden einerseits die Funktionen sowie der Aufbau erläutert. Andererseits wird darauf eingegangen, welche Art von Informationen an den entsprechenden Stellen abrufbar ist beziehungsweise eingetragen werden muss.

3.1.3.2 Ermittlung einer beispielhaften Kriterienhierarchie zur Orientierung

Die Bewertung von energetischen Biomassenutzungskonzepten hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit ist schwierig. Um die situationsspezifisch relevanten Kriterien aus den Dimensionen Ökologie, Ökonomie, Soziales und Technik zu ermitteln, ist somit Fachwissen aus mehreren Disziplinen erforderlich. Daher wurde im vorliegenden Fall das interdisziplinäre Wissen der Projektgruppe genutzt, um eine beispielhafte Kriterienhierarchie aufzustellen, die als Orientierung für weitere Anwendungen dienen kann. Wichtig ist jedoch zu bemerken, dass jedes Entscheidungsproblem einzigartig ist und somit die zur Verfügung gestellten Kriterien nur eine Grundlage darstellen. Unterstützt wird dieser Gedanke durch die Erkenntnis von Keeney (2013), dass Entscheidungsträger im Schnitt zunächst sieben Kriterien als wichtig nennen, jedoch nach Rücksprache mit dem Analysten auf ca. 20 Kriterien erhöhen. Hierdurch wird deutlich, dass eine beispielhafte Kriterienhierarchie nicht nur einen Wissenstransfer liefert, sondern auch dahingehend nützlich ist, komplexe Probleme adäquat zu erfassen.

Die entwickelte Kriterienhierarchie ist in Tabelle 3-2 am Ende dieses Kapitels aufgeführt. Die Erstellung war hierbei ein stetiger Prozess im Rahmen mehrerer Diskussionen, in denen eine regelmäßige Überprüfung und Anpassung stattgefunden hat. Zur besseren Handhabbarkeit in der Praxis wurde weiterhin eine verkürzte Kriterienliste entwickelt.

Auch hinsichtlich der anschließenden Ermittlung der Kriterienausprägungen bestand ein enger Austausch mit den weiteren Teilprojekten, wobei die Datenbeschaffung eine der größten Herausforderungen war. Die verwendeten Ansätze zur Messung der aufgeführten Kriterien stellen daher eine weitere Orientierungshilfe

für zukünftige Anwendungen dar. Eine ausführliche Erläuterung der Kriterien und derer potenzieller Messung findet sich im Beitrag von Eigner-Thiel et al. (2013), der innerhalb des vom Projektteam verfassten Buches „Sustainable Bioenergy Production: An Integrated Approach" veröffentlicht wurde.

Ein guter Nachweis für die Sinnhaftigkeit der beispielhaften Kriterienhierarchie konnte im Rahmen der praktischen Anwendung in der niedersächsischen Ortschaft erbracht werden. So nannten die anwesenden Teilnehmer, ohne vorherige Kenntnis der im Projekt entwickelten Kriterienhierarchie, eine Vielzahl an darin aufgeführten Kriterien als für sie relevant. Nach einer anschließenden Konfrontation mit den weiteren Kriterien bestätigten sie, dass die zusätzlichen Kriterien auch wichtig seien und berücksichtigt werden sollen, obwohl sie ihnen vorher nicht bewusst waren. Bei Rückmeldungen zur Veranstaltung wurde positiv erwähnt, dass durch das Aufstellen der zusätzlichen Kriterien ein umfangreicheres Bild hinsichtlich der Biomassenutzung und ihrer potenziellen Auswirkungen bestünde. Hieraus wird eines der Ziele einer multikriteriellen Entscheidungsunterstützung deutlich, nämlich die Schaffung eines besseren Verständnisses beim Entscheidungsträger hinsichtlich des Entscheidungsproblems. Die entwickelte Kriterienhierarchie stellt demnach ein geeignetes Werkzeug dar, erhaltene Erkenntnisse anzuwenden und für zukünftige Anwendungen verfügbar zu machen.

3.1.3.3 Erstellung eines allgemeinen MCDA-Leitfadens

Da es sich bei MCDA-Methoden um Verfahren handelt, bei denen explizit die Partizipation der Entscheidungsträger ermöglicht wird, kommt dem korrekten Verständnis der Funktionsweise eine wichtige Rolle zu. Um dieses bei Beteiligten, Entscheidungsträgern und potenziellen Analysten zu schaffen, wurde ein anwendungsorientierter und leicht verständlicher MCDA-Leitfaden konzipiert (Geldermann & Lerche 2014). Er soll dazu beitragen, die Transparenz zu verbessern und einen Überblick über die Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen einer Anwendung von MCDA-Methoden liefern. Der Anspruch des Leitfadens liegt daher darin, die Wirkungsweise von MCDA-Methoden und deren korrekte Anwendung verständlich zu vermitteln. Zu diesem Zweck werden an den entsprechenden Stellen veranschaulichende Beispiele eingesetzt. Zwar existiert bereits ein guter Leitfaden zur Anwendung von MCDA-Methoden (Department for Communities and Local Government: London 2009), jedoch ist dieser auf Englisch. Da aber ein möglichst breites Spektrum an Zielgruppen erreicht werden soll, wurde ein Leitfaden in deutscher Sprache verfasst.

Zu Beginn des Leitfadens werden zunächst die relevanten Begrifflichkeiten im Rahmen von MCDA-Methoden praxisnah erläutert. Anschließend werden die Anforderungen beschrieben, die für eine praktische Umsetzung von Bedeutung sind. In diesem Zusammenhang werden auch die einzelnen Schritte im Rahmen des strukturierten Entscheidungsunterstützungsprozesses erklärt. Dieser Teil richtet sich daher primär an potenzielle Analysten. Des Weiteren wird die MCDA-

Methode PROMETHEE vorgestellt, um die der Software zugrundeliegende Berechnungslogik transparent zu vermitteln. Weiterhin ist eine Literaturauswahl für eine weiterführende Einarbeitung in die Thematik angefügt. Der Leitfaden wird zusammen mit der Open-Source-MCDA-Software über die Homepage der Professur für Produktion und Logistik der Georg-August-Universität Göttingen veröffentlicht (das Benutzerhandbuch finden Sie im Kap. 5.1).

3.1.4 Diskussion

Die übergeordneten Ziele des Gesamtprojekts lagen für die zweite Projektphase in der *Anwendung* der Ergebnisse der ersten Projektphase, der Schaffung eines *Wissenstransfers* zu den Anwendern, der Intensivierung der *Partizipation* und der Entwicklung eines *Entscheidungsunterstützungskonzepts*. In diesem Teilprojekt wurden daher Produkte entwickelt, die zur Erreichung dieser Ziele ihren Teil beitragen.

Die Ergebnisse aus der ersten Projektphase wurden im Rahmen einer praktischen Anwendung in einem Dorf in Niedersachsen eingesetzt. So wurde nicht nur ein Entscheidungsunterstützungsprozess eingeleitet und mit der MCDA-Methode PROMETHEE vor Ort durchgeführt, sondern auch die entwickelte Kriterienhierarchie als hilfreiche Orientierung eingesetzt. Die erstellte spezifische Biomasse-Kriterienhierarchie ist ein wichtiges Instrument zum Wissenstransfer, wie insbesondere aus den sehr positiven Rückmeldungen innerhalb der praktischen Anwendung deutlich wurde. Die Anwendbarkeit dieser Kriterienhierarchie ist jedoch stark von dem betrachteten Entscheidungsproblem und den damit verbundenen Zielen und Alternativen abhängig. Daher ist ausdrücklich hervorzuheben, dass diese nur zur Orientierung dienen kann. Wird z.B. der Status quo oder die Errichtung fossiler Kraftwerke, wie einem Erdgas-BHKW, als Alternative in Betracht gezogen, so muss die Kriterienhierarchie dementsprechend angepasst werden. Aus diesem Grund ist die flexible Gestaltung der Kriterienhierarchie im Rahmen der Open-Source-MCDA-Software zur nachträglichen Auf- und Rücknahme von Kriterien von großem Nutzen. Innerhalb der exemplarischen Anwendung wurde zudem festgestellt, dass das Nachvollziehen der Wirkungsweise von MCDA-Methoden Laien teilweise schwerfällt. Daher wurde ein leicht verständlicher Leitfaden entwickelt.

Das Ziel der Partizipation wichtiger Interessensgruppen wird im Allgemeinen durch die Anwendung der Entscheidungsunterstützung ermöglicht. So können sich die Beteiligten durch die Nennung potenzieller Alternativen, der Aufstellung der zugrundeliegenden Kriterienhierarchie sowie der Gewichtung der Kriterien einbringen. Die aktive Partizipation am Entscheidungsprozess wurde hierbei von den Teilnehmern des niedersächsischen Dorfs als besonders positiv empfunden. Genannt wurde in diesem Zusammenhang auch, dass durch die aktive Einbindung ein Gefühl entsteht, dass es „mit der Umsetzung voran geht“. Dem Aspekt der Partizipation kommt daher ein wichtiger Teil zu, sodass eine umfassende vorherige

Information aller Interessengruppen sichergestellt werden sollte (siehe hierzu Kap. 3.8).

Für die Erstellung des ganzheitlichen Entscheidungsunterstützungskonzeptes können schließlich sämtliche Produkte dieses Teilprojekts Verwendung finden. So stellt die entwickelte Open-Source-MCDA-Software eine Grundlage dar, um die entsprechenden Daten aus den anderen Teilprojekten bzw. die Informationen aus den Workshops zu sammeln, aufzubereiten und auszuwerten. Hierdurch fließt eine Vielzahl an Erkenntnissen aus den verschiedenen Bereichen ein. Die Ermittlung adäquater Daten für neue Anwendungsfälle muss jedoch zukünftig durch die potenziellen Anwender vorgenommen werden, da jedes Entscheidungsproblem individuell ist. Da erkannt wurde, dass die Datenermittlung für Fragestellungen zur energetischen Nutzung von Biomasse nicht nur schwierig und aufwendig ist, sondern auch Wissen aus diversen Fachbereichen erfordert, stellen die weiteren Forschungsergebnisse und Orientierungswerte, die im Rahmen des Gesamtprojekts erzielt wurden, eine zusätzliche wertvolle Grundlage dar.

3.1.5 Schlussfolgerungen für die Praxis

Die praktische Anwendung der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung wurde positiv von der Bevölkerung aufgenommen. Die verfolgten Ziele, nämlich das Verständnis der Beteiligten für das ganzheitliche Problem der energetischen Nutzung von Biomasse und deren Konsequenzen zu erhöhen sowie eine stärkere Partizipation zu ermöglichen, konnten realisiert werden. Eine Übertragung der in diesem Teilprojekt geschaffenen Produkte auf zukünftige Fälle erscheint daher sinnvoll und hilfreich. Die in diesem Teilprojekt bereitgestellten Produkte sollen helfen, eine zukünftige Anwendung von MCDA-Methoden zu ermöglichen, indem frei zugängliche Software zur Berechnung sowie eine Dokumentation zum Wissenstransfer zur Verfügung gestellt werden.

Um in Zukunft eine sinnvolle Entscheidungsunterstützung zu gewährleisten, müssen jedoch einige Faktoren erfüllt sein. Zunächst muss der Prozess durch erfahrene Analysten begleitet werden, die sowohl methodisches Wissen hinsichtlich MCDA-Methoden aufweisen als auch soziale Prozesse moderieren können (siehe Kap. 3.8). Die Übersetzung und Erläuterung der Methode sowie der einzelnen Bestandteile (Alternativen, Kriterien, Ausprägungen) für die Interessensgruppen ist wichtig. Da zudem Fachwissen aus unterschiedlichen Disziplinen benötigt wird, sollte ein zukünftiger Begleiter bzw. Analyst des Entscheidungsprozesses über Zugang zu verschiedenen Quellen oder Experten verfügen. Im Rahmen des Projekts konnte diese Anforderung durch die interdisziplinäre Projektgruppe sichergestellt werden.

Tabelle 3-2: Entwickelte Kriterienhierarchie aus der ersten Projektphase

Ökologische Ziele	Unterziele	Attribut	Einheit	Min/ Max
Luft und Klimaschutz	Klimaerwärmung	Treibhausgaspotenzial	CO_2-Äq./ha	Min
	Toxische Substanzen	Feinstaubmenge	mg PM_{10}/m^3	Min
		Organische Schadstoffe	mg organ. Schadstoff/m^3	Min
		Anorganische Schadstoffe	mg anorgan. Schadstoff/m^3	Min
	Versauerung	Versauerungspotenzial	mg SO_2-Äq. /m^3	Min
Wasserschutz	Aquatische Eutrophierung	Eintrag Dünger (Stickstoff)	kg Dünger (Stickstoff)	Min
		Eintrag Dünger (Phosphor)	kg Dünger (Phosphor)	Min
	Toxische Substanzen	Pflanzenschutzmitteleintrag	kg Pestizide	Min
Bodenschutz	Erosion	Bodenbearbeitungsklasse	Punktwert Ordinalskala	Min
		Bodenbedeckung	%	Max
	Terristrische Eutrophierung	Eintrag Dünger (Stickstoff)	kg Dünger (Stickstoff)	Min
		Eintrag Dünger (Phosphor)	kg Dünger (Phosphor)	Min
	Toxische Substanzen	Schadstoffeintrag	kg Referenzsubstanz	Min
		Schadstoffmobilisierung	kg mobilisierte Referenzsubstanz	Max
Ressourcen schonung	Energieträger	Knappheit fossiler Energieträger	kg Rohöläquivalente	Min
Ressourcen schonung	Energieträger	Kumulativer Energieaufwand	MJ	Min
	Mineralien	Phosphaterzmenge	kg Phosphat	Min
	Flächenverbrauch	Flächenbedarf	ha	Min
	Wasserbrauch	Wasserbedarf	m^3	Min
Biodiversität	Kulturartendiversität	Kulturarten anzahl	Anzahl	Max
	Verwendung synth. Pflanzenschutzmittel	Eintrag synthet. Pflanzenschutzmittel	kg Pestizide	Min
	Verwendung synth. Dünger (Stickstoff)	Eintrag synth. Dünger (Stickstoff)	kg Dünger (Stickstoff)	Min

Ökonomische Ziele	**Attribut**	**Einheit**	**Min/ Max**
Perspektive: Betreiber	Kapitalwert	€	Max
	Vertragslänge	Punkte (Jahre)	Max
Perspektive: Arbeitnehmer	Gewinnbeteiligung	Punkte (Ja/Nein)	Max
	Zusatzmöglichkeit Honorarbasis	Punkte (Ja/Nein)	Max
Perspektive: Wärmekunden	Wärmepreis	€ pro Jahr	Min
	Mindesteinlage	€	Min
	Kosten Anschluss und Umstellung	€	Min
Perspektive: Landwirte	Preiseinfluss	Punkte	Max
	Operative Flexibilität	pro Jahr ein Punkt	Max
Perspektive: Region	Regionale Wertschöpfung	% der Investition	Max
	Laufende regionale Wertschöpfung	€	Max
	Steuereinnahmen	€	Max
Soziale Ziele	**Attribut**	**Einheit**	**Min/ Max**
Akzeptanz	Landschaftsästhetik	Punkte	Max
	Anlagenästhetik	Punkte	Max
	Wahrgenommener Geruch	Punkte	Min
	Lärm (Anlage)	Punkte	Min
	Lärm (Transporte)	Punkte	Min
Partizipation	Partizipation Planung	Punkte	Max
	Partizipation Finanzierung	Punkte	Max
	Informiertheit	Punkte	Max
Psychologische Auswirkungen	Unabhängigkeit Energieversorgungsunternehmen	Punkte	Max
	Unabhängigkeit fossile Energieträger	Punkte	Max
	Wir-Gefühl	Punkte	Max
	Selbstwirksamkeitsüberzeugung	Punkte	Max
	Stolz, Spaß, Sinnerleben	Punkte	Max
	Image des Dorfes	Punkte	Max
	Unfälle	Punkte	Min
Arbeitsplätze	Netto-Arbeitsplätze	Punkte	Max
	Netto-Arbeitsplätze (Teilzeiteignung)	Punkte	Max
Technische Ziele	**Attribut**	**Einheit**	**Min/ Max**
Anlagenwirkungsgrad	Wirkungsgrad thermal	%	Max
	Wirkungsgrad elektrisch	%	Max
	Wärmenutzung im Sommer	Punkte (ja/nein)	Max
	Modularität	Punkte	Max
Transport	Transporthäufigkeit	Punkte	Min
	Transportzeitpunkt	Punkte	Min
Verwaltungsaufwand	Laufzeit Lizenz	Tage	Min

Durch die praktische Anwendung in einem Dorf in Niedersachsen trat zudem eine weitere Anforderung für die Anwendung von MCDA-Methoden in den Vordergrund. So wurde deutlich, dass die tatsächliche Existenz eines Entscheidungsproblems im Vorfeld detailliert geklärt werden muss. Eine Anwendung von MCDA-Methoden ist demnach nicht zu empfehlen, falls nur die Vorteilhaftigkeit eines Anlagenbaus zu prüfen ist oder eine vorherig schon beschlossene Realisierung zusätzlich unterstützt werden soll. Zudem ist es auch denkbar, dass bei bestimmten Problemstellungen andere Methoden besser geeignet sind. Ist z. B. der Bau einer Anlage schon beschlossen und es soll nur noch ein geeigneter Standort ermittelt werden, so sollten andere Methoden aus dem Bereich der Optimierung angewendet werden, wie sie in Kapitel 3.2 vorgestellt werden.

Literatur

Belton, V. & Stewart, T.J. (2002). *Multiple Criteria Decision Making – An Integrated Approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Brans, J.P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24, 228-238.

Department for Communities and Local Government: London (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*. London

Eigner-Thiel, S. (2005). *Kollektives Engagement für die Nutzung erneuerbarer Energieträger - Motive, Mobilisierung und Auswirkungen am Beispiel des Aktionsforschungsprojekts „Das Bioenergiedorf"*. Studien zur Umweltpsychologie, Band 1. 310 S., Hamburg: Kovac.

Eigner-Thiel, S., Geldermann, J., Schmehl, M. (2012). Soziale Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit unterschiedlicher Biomassepfade. In Böttcher, J. (Hrsg.). *Management von Biogas-Projekten: Rechtliche, technische und wirtschaftliche Aspekte*. Berlin: Springer.

Eigner-Thiel, S., Schmehl, M., Ibendorf, J. und Geldermann, J. (2013). Assessment of different bioenergy concepts regarding sustainable development. In Ruppert, H. und Kappas, M. & Ibendorf,J. (Hrsg.). *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach*. S. 339-384, Berlin: Springer.

Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Geldermann, J. (1999). *Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung*. Dissertation. Fortschrittsberichte VDI. Vol. 16 (Technik und Wirtschaft), 233 S. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Geldermann, J. (2006). *Mehrzielentscheidungen in der industriellen Produktion*. 255 S. Habilitation. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

Geldermann, J. & Lerche, N. (2014). *Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung – Methode: PROMETHEE*. Professur für Produktion und Logistik, Georg-August-Universität Göttingen, 69 S. Gesichet am 30.4.2017: http://www.uni-goettingen.de/de/171915.html

Keeney, R.L. (2013). *Creating, Structuring, and Using Multiple Objectives*. (Presented at the 22nd International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Málaga, Spanien).

Lerche, N. (2016). *Die Integration der Prospect Theory in PROMETHEE am Beispiel der Nachhaltigkeitsbewertung von Konzepten zur energetischen Nutzung von Biomasse*. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen. 240 S., Cuvillier Verlag, Göttingen.

Lerche, N., Schmehl, M. & Geldermann, J. (2012). Sustainability Assessment of Concepts for Energetic Use of Biomass - A Multi-Criteria Decision Support Approach. In: Helber, S.; Breitner, M., Rösch, D.; Schön, C.; Graf von der Schulenburg, J.-M.; Sibbertsen, P.; Steinbach, M.; Weber, S.; Wolter, A. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2012*. Selected Papers of the German Operations Research Society (GOR), Leibniz Universität Hannover, Germany, September 5-7, 2012, Springer, Heidelberg.

Lerche, N. (2013). *Using methods of Multi-Criteria Decision Making to evaluate the sustainnability of bioenergy concepts by integrating adequate reference points*. (22nd International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Málaga, Spanien).

Lerche, N. & Geldermann, J. (2015a). Integration of Prospect Theory into PROMETHEE - A case study concerning sustainable bioenergy concepts. *International Journal of Multicriteria Decision Making* 5, 309 – 333.

Lerche, N., & Geldermann, J. (2015b). *Application of Methods from Multi-Criteria Decision Analysis for Sustainability Assessment of Bioenergy Concepts*. (5th Annual World Congress on Bioenergy, Xi'an, China).

Lerche, N., Wilkens, I., Schmehl, M., Eigner-Thiel, S. & Geldermann, J. (2015). *About the potential of MCDA-methods to foster stakeholders' participation in local energy projects*. (27th European Conference on Operational Research, Glasgow, Großbritannien).

Mustajoki, J. & Hämäläinen, R.P. (2000). Web-HIPRE: Global decision support by value tree and AHP analysis. *INFOR* 38, 208-220.

Oberschmidt, J. (2010). *Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme*, Dissertation, Stuttgart: Frauenhofer Verlag.

Omann, I. (2004). *Multi-Criteria Decision Aid as an approach for sustainable development analysis and implementation*, Dissertation, Karl-Franzens Universität Graz Österreich

Pohekar, S.D. & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 365-381.

Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Schmehl, M., Eigner-Thiel, S., Hesse, M., Ibendorf, J. & Geldermann, J. (2010). Development of an Information System for the Assessment of different Bioenergy Concepts regarding Sustainable Development. In: Teuteberg, M.G. (Hrsg.). *Corporate Environmental Management Information Systems: Advancements and Trends*. S. 318-336. Hershey: IGI Global.

UNCED (1992, Juni). *Earth Summit. United Nations Conference on Environment and Development*, Rio de Janeiro.

Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F. & Zhao, J.H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 2263-2278.

Zimmermann, H.J. & Gutsche, L. (1991). *Multi-Criteria Analyse*. Heidelberg: Springer.

3.2 Entwicklung eines Stoff- und Energiestrommodells für Biomasse unter Berücksichtigung mehrerer Zielsetzungen

Ingo Karschin, Jutta Geldermann

3.2.1 Problembeschreibung

Bioenergiedörfer nutzen nachwachsende Rohstoffe sowie Wirtschaftsdünger aus der Landwirtschaft zur Produktion von Strom und Wärme. Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit dieser dezentralen Strom- und Wärmeversorgung müssen verschiedene Faktoren von der Bereitstellung der Substrate, über die Produktion bis zur Distribution der Wärme betrachtet werden. Auf der Beschaffungsseite müssen unter anderem die Biomasseverfügbarkeit sowie die anfallenden Logistikkosten berücksichtigt werden. Dies impliziert eine Betrachtung der Erträge der entsprechenden Ackerschläge sowie der anfallenden Transport- und Lagerkosten in Abhängigkeit von den Entfernungen der landwirtschaftlichen Flächen zur Biogasanlage. Aber auch Aspekte der Biodiversität spielen bei der energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen eine wichtige Rolle. Dabei müssen die Nutzung verschiedener Fruchtfolgen und deren Auswirkungen auf den Biomasseertrag berücksichtigt werden. Klimatische Veränderungen können bei der langfristigen und robusten Planung der Biomasseversorgung ebenfalls eine Rolle spielen. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen bezieht die strategische Kapazitäts- und Standortplanung für die Strom- und Wärmebereitstellung die Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten der Biogasanlagen und der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mit ein. Eine effiziente Wärmeverteilung ist abhängig von den Investitions- und Wartungskosten der Nahwärmenetze als auch von den Wärmebedarfen und der Anschlussbereitschaft der Endverbraucher. Unter Berücksichtigung dieser und weiterer gegebener Parameter ergeben sich verschiedene Fragestellungen der langfristigen Produktions- und Logistikplanung: Wie viel Substrat kann zu welchen Preisen an die Biogasanlage geliefert werden? Welche elektrische Leistung kann unter Berücksichtigung der Biomasseverfügbarkeit installiert werden? Welche Anlagenkapazität ist im Hinblick auf die Wärmebedarfe der Endkunden und auf die Bedingungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes sinnvoll und wirtschaftlich? Wo ist der optimale Standort für die Biogasanlage und das Blockheizkraftwerk? Wie viele und welche Wärmekunden lassen sich wirtschaftlich profitabel an das Nahwärmenetz anschließen und was ist der optimale Netzverlauf? Viele dieser Fragestellungen sind eng miteinander verknüpft und voneinander abhängig, so dass eine simultane Optimierung unter Berücksichtigung der Substratbeschaffung sowie der Bereitstellung und Distribution der Wärme notwendig ist.

3.2.2 Methoden

In diesem Subprojekt wurde ein Modell zur ökonomischen Bewertung verschiedener Anlagen- und Netzkonstellationen unter Berücksichtigung der Beschaffungsseite entwickelt. Die betrachtete Zielgröße ist dabei der Kapitalwert, mit dessen Hilfe die einzelnen Parameter des Nahwärmekonzeptes bewertet werden, um eine ökonomische Optimierung mit Hilfe eines gemischt-ganzzahligen linearen Programms zu ermöglichen.

3.2.2.1 Ökonomische Bewertung mit Hilfe der Kapitalwertmethode

Die im alten EEG (2012) festgelegte Einspeisevergütung für Strom aus Biomasse ist für 20 Jahre zuzüglich des Jahres der Inbetriebnahme der Anlage garantiert. Aus diesem Grund wird für die Energieerzeugungsanlage inklusive Nahwärmenetz ein Planungshorizont von 20 Jahren angenommen. Mit der Kapitalwertmethode wird ein dynamisches und damit mehrperiodiges Verfahren für die Bewertung der Substratbeschaffung, der Biogasanlagen, der potenziellen Wärmekunden und der Netzteilstücke gewählt. Dabei wird der Kapitalwert (Barwert) einer Investition errechnet, indem die durch die Investition entstehenden (z.B. jährlichen) Zahlungsreihen auf den Beginn des Planungszeitraumes (Investitionszeitpunkt) abdiskontiert werden. Der Kapitalwert kann als Geldvermögenszuwachs interpretiert werden, der zu Beginn des Planungszeitraumes und unter der Berücksichtigung von Zinsen (Kalkulationszinssatz) durch die Investition erzielt wird. In dem Modell werden die betrachteten Investitionen an einer Alternativinvestition am Kapitalmarkt gemessen, die zum Kalkulationszinssatz verzinst wird. Ein positiver Kapitalwert zeigt dementsprechend an, dass eine Investition in die dezentrale Nahwärmeversorgung eine höhere Verzinsung erzielt als eine Anlage des gleichen Betrags am Kapitalmarkt. Ist der Kapitalwert einer Investition positiv, dann ist die Verzinsung des gebundenen Kapitals höher als der Kalkulationszinssatz und die Investition vorteilhaft. Ist der Kapitalwert negativ, kann die Investition als unvorteilhaft gegenüber der Alternativinvestition bezeichnet werden. Nach der Bewertung der einzelnen Aspekte der dezentralen Nahwärmeversorgung lässt sich damit eine ökonomische Optimierung der dezentralen Nahwärmeversorgung durchführen, indem der Kapitalwert der gesamten Investition über eine zu maximierende Zielfunktion dargestellt wird

3.2.2.2 Substratbeschaffung und Bereitstellungskosten

Die Erntelogistik für Biomasse besteht aus den drei Komponenten Feldarbeit, Transport und Festfahren im Silo. Um eine gute Ernteleistung und Silagequalität gewährleisten zu können, müssen die drei Glieder aufeinander abgestimmt werden. Basierend auf den Daten des Feldarbeitsrechners des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL 2006) werden die Erntekosten für Silomais in Abhängigkeit der Entfernung vom Feld zur Anlage und des Ertragsni-

veaus dargestellt. Alle anfallenden Kosten bis zum Eintrag in die Biogasanlage werden berücksichtigt. Die Erntekosten pro Tonne Frischmasse sinken dabei mit steigendem Ertragsniveau und steigen auf Grund höherer Transportkosten mit der Transportentfernung. Die Abhängigkeit der Erntekosten von der Transportdistanz kann mit Hilfe der Regressionsrechnung als lineare Funktion approximiert werden. Die so berechneten variablen Transportkosten belaufen sich auf 0,24 € pro km und Tonne Frischmasse. Diese variablen Transportkosten können für die weitere Berechnung der Substratkosten verwendet werden, falls keine genaueren Daten vorliegen oder die Anbauflächen von Jahr zu Jahr variieren. Diese gemittelten Werte sind vor allem bei der Bewertung verschiedener Fruchtfolgen wichtig, bei denen über die Jahre das Substrat auf unterschiedlichen Flächen angebaut wird. Bei exakt vorliegenden Daten über die Schlaggröße, das Ertragsniveau und die Entfernungen zu der Anlage können die Logistikkosten für die Substratbereitstellung aber auch mit den vorhandenen Parametern ermittelt werden.

Bioenergiedörfer erhalten die benötigten Substrate für die Biogasanlage meistens von den ortsansässigen Landwirten, so dass kein regionaler Handel mit Biomasse notwendig ist. Dadurch können die Kosten des Energiepflanzenanbaus standortspezifisch ausgerechnet werden. In Abhängigkeit der Ertragsniveaus der Ackerflächen, der Schlaggröße und der Transportentfernungen ergeben sich unterschiedliche Biomassekosten für Silomais und für die verschiedenen Arten von Ganzpflanzensilage. Für Silomais und Winterweizen liegen gemittelte Preise gemäß KTBL (2009) vor. Die Transportentfernungen werden variabel gehalten, so dass mit Hilfe der vorher ermittelten variablen Transportkosten unterschiedliche Feld-Anlage-Entfernungen problembezogen berücksichtigt werden können. Ist der Anlagenbetreiber nicht gleichzeitig auch der Biomasseproduzent und -lieferant, müssen die Preise mit den Biomasselieferanten vertraglich vereinbart werden. Da Energiepflanzen in der Regel nur regional gehandelt werden, werden in dieser Untersuchung jedoch lediglich die Landwirte vor Ort als potenzielle Rohstofflieferanten betrachtet. Die an die Landwirte zu zahlenden Energiepflanzenpreise hängen dann von den Marktpreisen der Pflanzen ab, die durch den Energiepflanzenanbau verdrängt werden oder alternativ auf dem Acker angebaut werden könnten. Als Referenzfrucht kann beispielsweise Winterweizen für den Nahrungsmittelmarkt verwendet werden. Diese Daten und die benötigten Substratmengen fließen im Modell direkt in die Kapitalwertberechnung für die verschiedenen Biogasanlagen ein. Die Kapitalwerte werden dabei in Abhängigkeit der installierten elektrischen Leistung der Biogasanlagen berechnet. Ergeben sich standortspezifisch andere Substratkosten, können diese ohne Probleme bei der Berechnung der Kapitalwerte für Biogasanlagen verwendet werden. Da diese Kapitalwerte als Parameter im Optimierungsmodel eingesetzt werden, wird jede Änderung bei den Biomassekosten auch bei der Optimierung berücksichtigt.

3.2.2.3 Ökonomische Bewertung der Biogasanlagen

Zur ökonomischen Bewertung der Biogasproduktion wird ebenfalls die Kapitalwertmethode verwendet. Aufgrund der ortsspezifischen Agrarstrukturen, Biomasseverfügbarkeiten und den damit einhergehenden unterschiedlichen technischen Anforderungen an die Biogaserzeugung ist eine Wirtschaftlichkeitsaussage auf Basis eines einzelnen Parameters, wie beispielsweise der installierten elektrischen Leistung, nicht möglich (KTBL 2007). Aus diesem Grund werden bestimmte, realistische Annahmen bezüglich Substrat, Fermentationsverfahren, BHKW-Motoren etc. getroffen, so dass für unterschiedliche elektrische Leistungsgrade von Biogasanlagen eine ökonomische Bewertung mit Hilfe der Kapitalwertmethode möglich ist.

Bei der Berechnung der Kapitalwerte werden die Investitionen in die Biogasanlage, die anlagenbezogenen Auszahlungen, die rohstoffbezogenen Auszahlungen sowie die Stromeinspeisevergütung jeweils in Abhängigkeit der installierten elektrischen Leistung berücksichtigt. Bei den Investitionen in die Anlagen treten mit zunehmenden Kapazitäten Größendegressionseffekte auf. Diese Effekte führen bei großen Anlagen zu geringeren Investitionen pro Kilowatt installierter elektrischer Leistung. Die anlagenbezogenen Auszahlungen beinhalten die Posten Betriebsstoffe, Wartung und Reparatur, Laboranalysen, Versicherung und Personal. Die rohstoffbezogenen Auszahlungen können mit Hilfe der oben genannten Logistik- und Substratkosten berechnet werden. Die Einspeisevergütung wird je nach Inbetriebnahme der Biogasanlage durch das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG 2009 und EEG 2012) geregelt (siehe Tabelle 3-3, Tabelle 3-4).

Tabelle 3-3: Einspeisevergütung [€ ct/kWh] für Strom aus Biomasse (EEG 2009)

Anlagenleistung	<150 kW	150-500 kW	500-5000 kW
Grundvergütung	11,67	9,18	8,25
+ NaWaRo-Bonus	7	7	4
+Gülle-Bonus	4	1	0
Gesamt	22,67	17,18	12,25
KWK-Bonus	3	3	3

Tabelle 3-4: Einspeisevergütung [€ ct/kWh] für Strom aus Biomasse (EEG 2012)

Anlagen-leistung	Grund vergütung	Vergütungs-klasse I	Vergütungs-klasse II	Gülle/Mist
bis 150 kW	14,3	6	8	8
bis 500 kW	12,3	6	8	8
bis 750 kW	11	5	8	6
bis 5000 kW	11	4	8	6

Die Grundvergütung plus mögliche Boni für jede in das Netz eingespeiste Kilowattstunde Strom aus erneuerbaren Energien werden über einen Zeitraum von 20

Kalenderjahren zuzüglich des Jahres der Inbetriebnahme gezahlt. Durch Abzinsen der Ein- und Auszahlungen über den betrachteten Planungshorizont von zwanzig Jahren kann anschließend auf Basis der oben ermittelten Investitionen, Einspeisevergütungen und den betriebsbedingten und verbrauchsbedingten Auszahlungen der Kapitalwert für jede beliebige Anlagenleistung berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass die jährlichen Zahlungsströme über die gesamten 20 Jahre gleichbleiben. Da die Einspeisevergütungen nach dem EEG 2009 und dem EEG 2012 unterschiedlich ausfallen, müssen für beide gesetzlichen Vorgaben die Kapitalwerte berechnet werden. Die Kapitalwerte werden dabei für eine diskrete Menge von Biogasanlagen in 23 unterschiedlichen Leistungsklassen von 100 kW_{el} bis 2 MW_{el} angegeben.

3.2.2.4 Ökonomische Bewertung der Wärmekunden und Netzteilstücke

Um eine ökonomische Optimierung des gesamten Nahwärmekonzeptes zu ermöglichen, müssen auch die Haushalte und die Rohrleitungsstücke mit Hilfe der Kapitalwertmethode bewertet werden. Wie sich die Wärmeabnahmemenge der einzelnen Haushalte über den gesamten Planungszeitraum hinweg entwickelt, lässt sich allerdings nur schwer vorhersagen. Neben der zukünftigen Entwicklung der klimatischen Bedingungen sind vor allem Investitionen der Wärmeabnehmer in eine verbesserte Wärmedämmung oder in alternative Energieerzeugungsanlagen zu bedenken. Auch eine generelle Einstellungs- und Verhaltensänderung der Wärmekunden könnte den Wärmebedarf möglicherweise signifikant beeinflussen. Aufgrund dieser Unabwägbarkeiten werden durchschnittliche Wärmeabnahmemengen pro Jahr und Wärmeabnehmer angenommen, die über den Planungszeitraum von 20 Jahren konstant bleiben. Lediglich eine maximale Wärmeabnahmemenge, die im Winter bedient werden muss, wird berücksichtigt, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. In Anlehnung an Daub et al. (2013) und die von Ruppert et al. (2008) exemplarisch aufgeführten Wärmekundenverträge für Nahwärmenetze kann für jeden Haushalt der Kapitalwert unter Berücksichtigung der Auszahlungen für den Hausanschluss, die staatlichen Subventionen, des entsprechenden Wärmebedarfes und Auszahlungen für Wartungen berechnet werden.

Neben den Anschlussobjekten müssen auch die Netzteilstücke des Rohrleitungssystems für den Planungszeitraum von 20 Jahren ökonomisch bewertet werden. Dafür wird ebenfalls die Kapitalwertmethode verwendet. Bei den Berechnungen wird davon ausgegangen, dass die jährlichen Auszahlungen für die Wartungskosten konstant bleiben. Für jedes Netzteilstück zwischen zwei Anschlussobjekten wird der Kapitalwert in Abhängigkeit der Anschaffungsinvestitionen, der staatlichen Subventionen für Nahwärmenetze und der Wartung und Instandhaltung berechnet. Die Kapitalwerte der Anschlussobjekte und Netzteilstücke gehen anschließend genauso wie die Kapitalwerte der Biogasanlagen und der Substratbeschaffung als Parameter in das gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodell ein.

3.2.2.5 Simultanes Optimierungsmodell für die Nahwärmeversorgung

In der ersten Projektlaufphase wurde ein optimierendes Produktions- und Distributionsmodell aufgestellt, das basierend auf den oben aufgeführten Eingangsdaten (unter Berücksichtigung des EEG 2009) eine nach wirtschaftlichen Kriterien optimale Anlagenkapazität der Biogasanlage und des Blockheizkraftwerkes, sowie die bestmögliche Auslegung des Nahwärmenetzes ermittelt (Uhlemair 2012; Karschin 2015; Karschin & Geldermann 2015). Methodisch wurde ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem aufgestellt und mit Hilfe eines Branch-and-Bound-Algorithmus gelöst. Als Optimierungssoftware wird Xpress-Mosel verwendet. Dieses lineare Programm basiert auf der Idee des Steinerbaum-Problems (Voß 1990) und optimiert die Anlagengröße der Biogasanlage und simultan ein dazugehöriges Nahwärmenetz. Bezüglich des Nahwärmenetzes errechnet das Modell, welcher Haushalt als Wärmekunde an das Netz angeschlossen werden soll und welches der optimale Netzverlauf ist. Verschiedene Szenarien bezüglich der Bereitschaft der Dorfbewohner, sich an das Nahwärmenetz anschließen zu lassen, können durchgerechnet werden. Sollen bestimmte Haushalte oder öffentliche Gebäude, unabhängig von deren Wirtschaftlichkeit, Wärme über das Nahwärmenetz beziehen, so kann dies über entsprechende Restriktionen berücksichtigt und unterschiedlichste Szenarien mit der Optimallösung verglichen werden. Durch das Aufzeigen der wirtschaftlichen Konsequenzen unterschiedlicher Netzverläufe und Anschlussdichten kann die Entscheidungsfindung unterstützt werden (Uhlemair et al. 2014). In ersten Beispielrechnungen des Simultanmodells wurde als Rohstoffbasis von einem Substratmix bestehend aus Maissilage, Getreide-Ganzpflanzensilage (Winterweizen, Triticale und Winterroggen) und Rindergülle ausgegangen. In diesem Modell wird zur Energiebereitstellung eine einzelne Biogasanlage abgebildet.

In der zweiten Projektlaufphase wurde auf diesen Ergebnissen aufgebaut und das Modell um einige Aspekte erweitert. Zunächst mussten die Vergütungssätze an das neue EEG 2012 angepasst werden und neue Kapitalwerte für die Biogasanlagen berechnet werden. Des Weiteren fordert das neue EEG 2012 die Einhaltung bestimmter zusätzlicher Kriterien als Grundlage für die Förderung erneuerbarer Energien. Dazu gehört die Nutzung von 60 % der Abwärme oder die Nutzung von 60 % Gülle als Substrat in einer Biogasanlage, damit diese förderfähig ist. Diese Nebenbedingungen sind im Modell über eine direkte Angabe der verfügbaren Biomasse und die implizite Berechnung des genutzten Wärmeanteils umgesetzt. Die Vorgabe der verfügbaren Substrate ermöglicht zudem eine bessere Anpassung auf die konkreten Planungsprobleme vor Ort, da die exakt verfügbaren Mengen individuell in dem Modell berücksichtigt werden können.

Diese direkte Betrachtung der Substratverfügbarkeit ermöglicht auch die Übernahme von Daten aus den anderen Kapiteln in das Modell. Zunächst können für eine betrachtete Zielregion optimierte Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau mit Hilfe der Ergebnisse aus dem Subprojekt „Integrativer Energiepflanzenbau" (siehe Kap. 3.3) beschrieben werden. Die Biomassepotenziale dieser Fruchtfolgen

werden anschließend mit Hilfe der Ertragsmodells BioSTAR (siehe Kap. 3.4) berechnet und können direkt in das Optimierungsmodell übernommen werden. Zusätzlich können verschiedene Szenarien im Hinblick auf Biodiversität durch unterschiedliche Fruchtfolgen (siehe Kap. 3.5) betrachtet werden. Auch die Einflüsse von Klimaveränderungen können über die Biomassepotenzialanalyse untersucht und über die verfügbare Substratmenge in dem Optimierungsmodell berücksichtigt werden.

In der zweiten Projektphase wurde das Modell dahingehend erweitert, dass die Darstellung mehrerer Biogasanlagen möglich ist. Die Kapazitätsplanung beschränkt sich damit nicht mehr nur auf eine einzelne Biogasanlage an einem vorgegebenen Standort. Diese Analysen betrachten dabei jedoch lediglich die ökonomischen Parameter, die unter anderem durch das EEG 2012 gegeben sind, welches kleinere Anlagen bevorzugt. Die Berücksichtigung mehrerer Anlagen setzt dabei mehrere potenzielle Standorte für diese Anlagen voraus. Um die Vorgaben nicht zu restriktiv zu halten, werden diese Standorte in dem Modell nicht festgelegt, sondern als integriertes Standortplanungsproblem mitbetrachtet. Dadurch werden simultan die Anzahl und Kapazität der Anlagen als auch deren Standorte im Netzwerk optimiert. Um die visuelle Vergleichbarkeit der Lösungen dieses Modells zu verbessern, wurde außerdem eine automatisierte, graphische Ausgabe der Lösungsgraphen implementiert. Dadurch lassen sich die Auswirkungen veränderter Parameter auf die Strukturen im Nahwärmenetz als auch auf die Standorte der Anlagen schnell und einfach erfassen.

In dem erweiterten Optimierungsmodell wird bei der Netzwerkoptimierung der Wärmeverlust im Nahwärmenetz berücksichtigt. Über zusätzliche Nebenbedingungen kann für jede potenzielle Verbindung im Netzwerk ein individueller, prozentualer Wärmeverlust angegeben werden. Dadurch werden lange oder wärmetechnisch ungünstige Verbindungen im Nahwärmenetz abgewertet, da diese einen höheren Wärmeverlust mit sich bringen. Auch die Standortwahl der Anlagen wird vom Wärmeverlust im Netzwerk beeinflusst. Im Vergleich zu dem Modell aus der ersten Projektphase, bei dem ein pauschaler Wärmeverlust von ungefähr 20 % angesetzt wurde, ermöglicht diese Erweiterung eine realitätsnähere Bewertung von effizienten lokalen Nahwärmekonzepten.

3.2.3 Ergebnisse

3.2.3.1 Sensitivitätsanalyse der Kapitalwerte für Biogasanlagen

Das vorliegende lineare Modell zur Optimierung von Bioenergiedörfern berücksichtigt nicht nur den Netzverlauf und die angeschlossenen Haushalte, sondern auch die Standort- und Kapazitätsplanung für die Anlagen und die Beschaffung und Logistik der benötigten Substrate. Zur Validierung des Modells wurden sowohl in der ersten als auch in der zweiten Projektphase Fallstudien durchgeführt (Uhlemair et al. 2014). Um die Qualität dieser Fallstudien einzuschätzen, ist es jedoch wichtig, die Robustheit der eingehenden Parameter zu betrachten. Besonderes Augenmerk liegt dabei

auf den Kapitalwerten der Biogasanlagen, die einen großen Anteil am Zielfunktionswert haben und gleichzeitig einigen unsicheren Faktoren unterliegen. Um diese Unsicherheiten zu analysieren, wird eine Sensitivitätsanalyse der Kapitalwerte unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren durchgeführt.

Als Ausgangspunkt für die Sensitivitätsanalyse wird eine Anlage mit 500 kW elektrischer Leistung betrachtet und unterstellt, dass 30 % des Substrates als Gülle zur Verfügung steht. Der Rest des Substrates setzt sich aus Mais- und Ganzpflanzensilage zusammen. Die betrachteten Faktoren sind unter anderem die fixen Substratkosten, die variablen Substratkosten, die Einspeisevergütung durch das EEG 2012 sowie der elektrische Wirkungsgrad. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

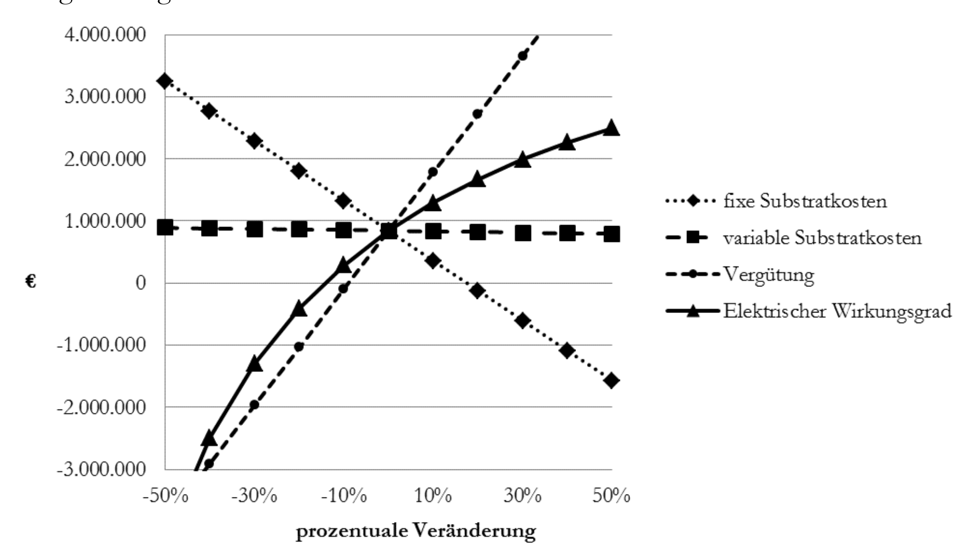


Abbildung 3-4: Sensitivitätsanalyse für den Kapitalwert einer 500 kWel Anlage

Aus der Sensitivitätsanalyse wird deutlich, dass der Kapitalwert einer Biogasanlage sensibel auf Veränderungen der Einspeisevergütung, der fixen Substratkosten und des elektrischen Wirkungsgrades der Anlage reagiert. Da bei der Kapitalwertberechnung das konkrete Wärmekonzept nicht betrachtet wird, handelt es sich ausschließlich um den elektrischen Wirkungsgrad. Weniger sensibel reagiert der Kapitalwert auf die variablen Substratkosten. Bei den Substratkosten ist zu sehen, dass eine prozentuale Veränderung der fixen Substratkosten sich ungleich stärker auf den Kapitalwert einer Anlage auswirkt als eine prozentuale Veränderung der variablen Substratkosten. Die berechneten *fixen Substratkosten* variieren je nach Energiepflanzen zwischen 35 € und 37 € pro Tonne Frischmasse und die berechneten variablen Substratkosten liegen bei 0,24 € pro Tonne und Kilometer Feld-Anlage-Entfernung. Eine prozentuale Veränderung der wesentlich höheren fixen Substratkosten hat daher einen stärkeren Einfluss auf den Kapitalwert als die prozentuale Veränderung der variablen Substratkosten.

Werden die *Vergütungssätze pro kWh* prozentual verändert, ergibt sich eine lineare Entwicklung der Kapitalwerte. Die Steigung der Geraden hängt dabei von der ursprünglichen Höhe der insgesamt erzielten Einspeisevergütung ab. Je höher die Stromerlöse (Anlagenleistung), desto steiler ist die Gerade, die die Veränderung des Kapitalwertes bei einer Veränderung der Vergütungssätze anzeigt. Aufgrund der beträchtlichen Höhe der Einspeisevergütung (siehe Tabelle 3-4) reagiert der Kapitalwert sehr sensibel auf eine Veränderung der Vergütungssätze. Die Nullstelle der von den Vergütungssätzen abhängigen Geraden liegt bei ungefähr 10 %. Daraus lässt sich folgern, dass ab einer Senkung der Einspeisevergütung von ca. 10 % eine 500 kW-Anlage negative Kapitalwerte besitzt und eine Investition in diese Anlage nicht mehr lohnenswert wäre. Damit ist dies ein Schwellenwert für das EEG, der angibt, ab welchem Vergütungssatz eine 500 kW-Anlage wirtschaftlich betrieben werden kann.

Erhöht (verringert) sich der *elektrische Wirkungsgrad* einer Anlage, ist für dieselbe Menge produziertem Strom weniger (mehr) Biomasse notwendig, folglich sinken (steigen) die verbrauchsbedingten Auszahlungen für das Gärsubstrat, woraus in der Konsequenz ein höherer (niedrigerer) Kapitalwert resultiert. Der thermische Wirkungsgrad wird hier nicht näher betrachtet, da in dieser Sensitivitätsanalyse ausschließlich die Energieerzeugungsanlage ohne Wärmekonzept untersucht wird. Steigt der elektrische Wirkungsgrad der Anlage, so kann mehr Energie aus der Biomasse in elektrische Energie umgewandelt werden, so dass die Menge an notwendiger Biomasse für eine 500 kW-Anlage insgesamt sinkt. Das Sinken der Menge an Biomasse bei steigendem Energieoutput der Biomasse verläuft jedoch degressiv. Aus dieser unterproportional verlaufenden Abnahme der notwendigen Menge an Biomasse ergibt sich der degressiv steigende Verlauf des Kapitalwertes bei steigendem elektrischem Wirkungsgrad.

Die Sensitivitätsanalyse der Kapitalwerte betrachtet die Energieerzeugung und die Wärmenutzung getrennt voneinander. Die Größe eines Nahwärmenetzes (bzw. die nachgefragte Wärmeleistung) und die Kapazität der Energieanlage sind allerdings eng miteinander verknüpft und voneinander abhängig. Die Kapazität einer Energieerzeugungsanlage richtet sich nicht nur nach der zur Verfügung stehenden Menge an Biomasse, sondern auch nach der nachgefragten Wärmemenge. Im Gegenzug begrenzt eine Anlagenkapazität das Ausmaß der Wärmeversorgung. Um diese Abhängigkeiten genauer zu betrachten, werden im Folgenden die beiden Fallstudien aus den zwei Projektphasen vorgestellt, anhand derer eine konkrete Nahwärmeversorgung untersucht und das Modell validiert wurde.

3.2.3.2 Fallstudie der ersten Projektphase

In der Fallstudie der ersten Projektphase wird ein fiktives Dorf betrachtet, in dem eine einzelne Biogasanlage mit Blockheizkraftwerk und Nahwärmenetz installiert werden soll. Die Biogasanlage soll mit circa 30 % Güllesubstrat betrieben werden und es wird davon ausgegangen, dass die ansässigen Landwirte jährlich 1800 m^3 Gülle und 4200 t Ganzpflanzensilage zur Verfügung stellen. Das Dorf besteht aus 44 Haushalten und die gesamte Wärmenachfrage aller Haushalte beträgt jährlich circa 1 Mio. kWh. Die Optimierung durch das Modell ergibt eine optimale Anlagenkapazität von 175 kW und das gesamte Projekt hat einen Kapitalwert von circa 830.000 €. Über einen Planungszeitraum von 20 Jahren kann diese Investition daher als ökonomisch vorteilhaft betrachtet werden. Allerdings werden bei dieser Lösung lediglich 18 Haushalte an das Nahwärmenetz angeschlossen. Die verfügbare Substratmenge ist nicht ausreichend, um weitere Haushalte an das Nahwärmenetz anzuschließen, obwohl dies ökonomisch profitabel wäre. Der Netzverlauf der optimalen Lösung ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

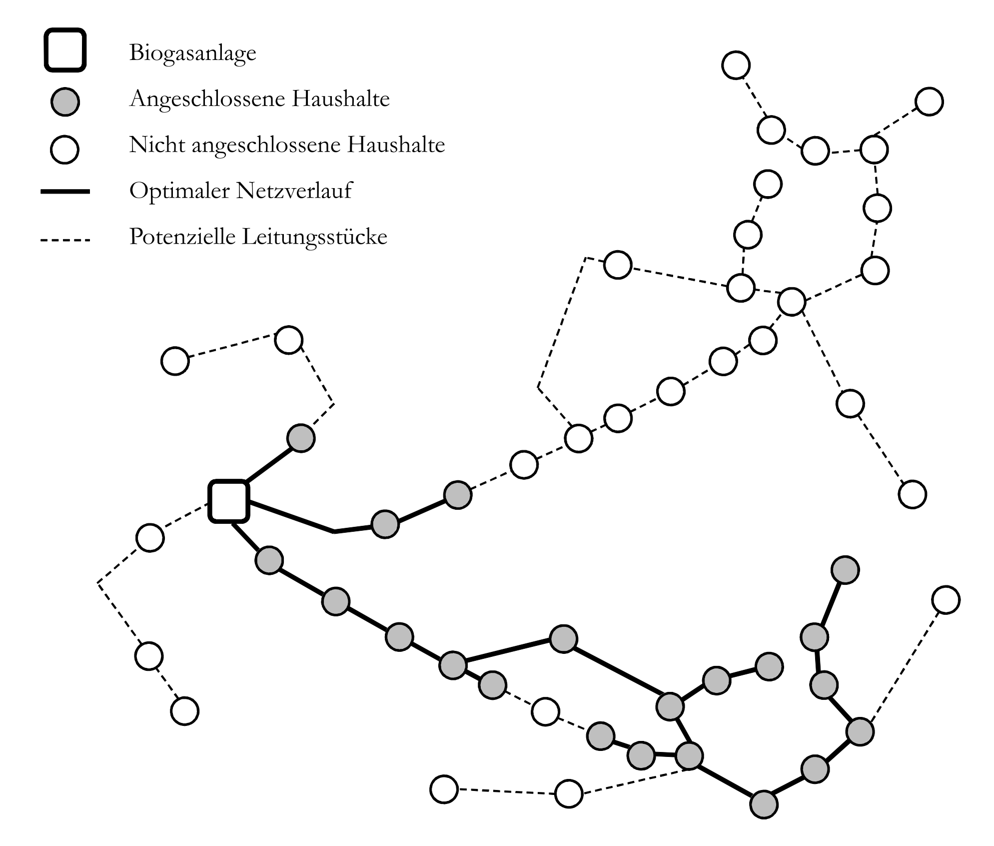


Abbildung 3-5: Optimales Nahwärmenetz bei geringer Substratverfügbarkeit

Dabei ist zu beachten, dass sechs der dargestellten Knoten keine Haushalte, sondern lediglich Kreuzungspunkte des Nahwärmenetzes darstellen und keinen eigenen Wärmebedarf aufweisen. Die Frage ist jedoch, ob die Akzeptanz des Projektes nicht verringert wird durch die Tatsache, dass nicht alle Haushalte an die Nahwärmeversorgung angeschlossen werden können. Um alle Haushalte versorgen zu können und einen Gülleanteil von 30 % des Substrates beibehalten zu können, müssten ungefähr 3300 m^3 Gülle und 7800 t Silage pro Jahr zur Verfügung stehen. Die Auswirkungen einer höheren Substratverfügbarkeit wird mit Hilfe verschiedener Szenarien untersucht, bei denen unterstellt wird, dass genug Gülle und Silage vorhanden ist, um alle Haushalte mit Nahwärme zu versorgen. Die Ausgangsparameter des betrachteten Dorfes bleiben dabei unverändert. Die vier untersuchten Szenarien sehen wie folgt aus:

- *Szenario 1*: Alle Haushalte wären bereit, an dem Projekt teilzunehmen, und das Modell optimiert die Anlagen- und Netzkonstellation mit Blick auf den Kapitalwert.
- *Szenario 2*: Alle Haushalte sind bereit teilzunehmen und werden auch an das Nahwärmenetz angeschlossen. Das Modell optimiert lediglich die Anlagenkapazität und den Netzverlauf.
- *Szenario 3*: Acht Haushalte wollen aus verschiedenen Gründen nicht an dem Projekt teilnehmen. Das Modell optimiert analog zu Szenario 1 die Nahwärmeversorgung der übrigen Haushalte.
- *Szenario 4*: Acht Haushalte wollen nicht teilnehmen und alle anderen Haushalte werden definitiv an das Netz angeschlossen. Kapazität und Netzverlauf werden optimiert.

Tabelle 3-5: Optimierte Ergebnisse der betrachteten Szenarien

	Anlagenleistung in kW_{el}	angeschlossene Haushalte	Kapitalwert in Tausend €
Szenario 1	500 kW	40	1388
Szenario 2	500 kW	44	1373
Szenario 3	500 kW	32	1229
Szenario 4	500 kW	36	1214

Die optimalen Lösungen der verschiedenen Szenarien sind in Tabelle 3-5 dargestellt. Die installierte Anlagenleistung ist für alle Szenarien identisch, da ausreichend Substrat vorhanden ist und die Anlage mit 500 kW elektrischer Leistung den höchsten Kapitalwert erzielt. In Szenario 1 sind zwar alle Haushalte bereit, an das Nahwärmenetz angeschlossen zu werden, allerdings sind vier Haushalte aus ökonomischer Sichtweise nicht profitabel und werden daher nicht angeschlossen. Dieses Szenario stellt eine ökonomische Benchmark dar und kann als Vergleichspunkt genutzt werden, da diese Lösung den optimalen Kapitalwert aller möglichen Anlagen- und Nahwärmenetzkonfigurationen aufweist. In Szenario 2 werden alle

Haushalte angeschlossen, was zu einem geringeren Kapitalwert führt, allerdings ist die Differenz von 15.000 € zum Szenario 1nicht sonderlich groß. Szenario 3 und 4 bilden die Möglichkeit ab, dass einige Haushalte nicht Teil des Nahwärmekonzeptes sein wollen. In Szenario 3 werden aus den übrigen Haushalten nur die profitablen ausgewählt und in Szenario 4 werden alle übrigen Haushalte angeschlossen. Die Kapitalwerte dieser beiden Szenarien unterscheiden sich ebenfalls lediglich um 15.000 €, wohingegen die Differenz zu den ersten beiden Szenarien fast 160.000 € beträgt. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass in diesem Fall der Verlust einiger potenzieller Wärmekunden eine deutliche Einbuße im Kapitalwert zur Folge hat. Der Ausschluss einiger weniger nicht profitabler, aber eigentlich anschlusswilliger Haushalte hingegen reduziert den Kapitalwert nur unwesentlich. Diese Erkenntnisse sollten jedoch nicht so interpretiert werden, als dass die 8 Haushalte überredet werden sollten, an dem Projekt teilzunehmen. Diese ökonomischen Analysen können vielmehr als Chance gesehen werden, ex post die Anschlussgebühren für die Haushalte oder den Wärmepreis zu verringern, um nicht partizipierende Haushalte gegebenenfalls durch finanzielle Anreize zu integrieren.

3.2.3.3 Fallstudie der zweiten Projektphase

In der zweiten Projektphase wurde mit dem erweiterten Modell eine Fallstudie für ein Dorf im Landkreis Wolfenbüttel durchgeführt. Die in den anderen Kapiteln vorgestellten Umfragen und Workshops (siehe Kap. 3.5 und Kap. 3.8) liefern den Großteil der Eingangsdaten für das Modell. Für das Dorf mit circa 300 Einwohnern und 80 Haushalten ist eine Biogasanlage mit angeschlossener Nahwärmenutzung geplant. Die Bereitschaft in der Bevölkerung, an diesem Projekt teilzunehmen, ist jedoch gemischt. Nur 28 Haushalte und das lokale Seniorenheim sind potenzielle Nahwärmeabnehmer. Die ansässigen Landwirte stellen auch lediglich 68 ha Land für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung, was einem jährlichen Ertrag von ca. 3000 t entspricht. Außerdem liefern die Landwirte jährlich ca. 200 t Wirtschaftsdünger aus der lokalen Tierhaltung an die Biogasanlage.

Mit diesen Parametern als Eingangsdaten für das Modell ergibt sich eine Anlagenkapazität von 125 kW mit einem optimalen Kapitalwert von ca. 200.000 €, was nicht einmal den staatlichen Subventionen für den Bau des Nahwärmenetzes entspricht. Außerdem können auf Grund der geringen Leistung nur 15 Haushalte an das Nahwärmenetz angeschlossen werden. Die übrigen Haushalte und das Seniorenheim können bei dieser geringen Leistung nicht mit Nahwärme versorgt werden. Der optimale Netzverlauf ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Beschränkender Faktor ist in diesem Fall die Biomasseverfügbarkeit. Für eine größere Biogasanlage steht nicht ausreichend Biomasse zur Verfügung, obwohl noch weitere Nahwärmekunden profitabel an das Netz angeschlossen werden könnten. Insbesondere das Seniorenheim ist als Großverbraucher ein lukrativer, aber nicht angeschlossener Wärmekunde.

Um die Auswirkungen erhöhter Biomasseverfügbarkeit zu analysieren, werden drei weitere Szenarien betrachtet. Die Annahmen für diese Szenarien sind:

- *Szenario 1*: Die ortsansässigen Landwirte stellen 150 ha Land für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung und liefern 200 t Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung.
- *Szenario 2:* Die Landwirte fokussieren sich auf den Energiepflanzenanbau auf insgesamt 300 ha Land. Es stehen weiterhin 200 t Wirtschaftsdünger pro Jahr zur Verfügung. Das Modell optimiert den Netzverlauf und wählt die profitablen Haushalte aus.
- *Szenario 3:* Die Landwirte stellen 300 ha Land und jährlich 200 t Wirtschaftsdünger zur Verfügung. Alle anschlusswilligen Haushalte werden angeschlossen.

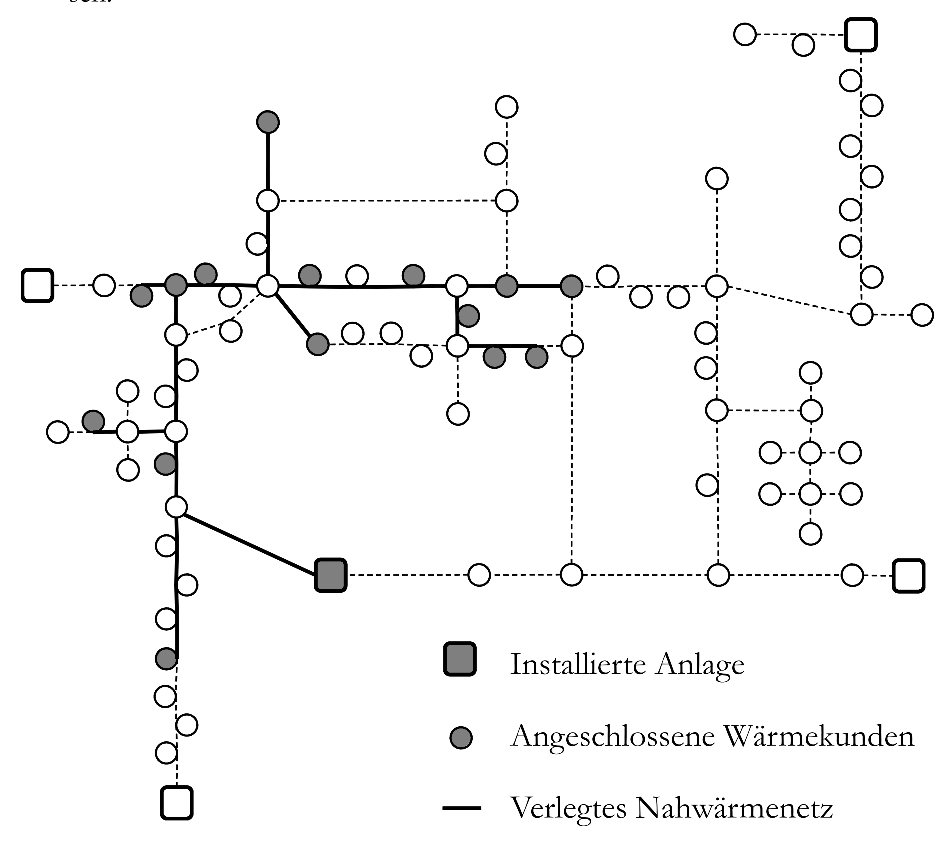


Abbildung 3-6: Optimales Nahwärmenetz für die aktuelle Planungssituation

Die optimalen Lösungen der verschiedenen Szenarien sind in Tabelle 3-6 gelistet und belegen, dass der beschränkende Faktor in dieser Planungssituation die Biomasseverfügbarkeit ist. Bei leicht erhöhter Verfügbarkeit in Szenario 1 können

bereits 26 Haushalte mit Nahwärme versorgt werden und das Projekt weist einen Kapitalwert auf, der um ein Vielfaches größer ist als bei den ursprünglichen Ausgangsparametern der Ist-Situation. Wird die Biomasseverfügbarkeit weiter erhöht (Szenario 2), kann auch das Seniorenheim profitabel an das Nahwärmenetz angeschlossen werden. In diesem Szenario wird eine 500 kW-Anlage betrieben und der optimale Kapitalwert ist nochmal um fast 400.000 € höher als in Szenario 1. Diese Ergebnisse machen deutlich, wie stark ein solches Nahwärmekonzept nicht nur von der Beteiligung der Bevölkerung, sondern auch von der Substratverfügbarkeit und damit indirekt von der Beteiligung der ansässigen Landwirte abhängt.

Tabelle 3-6: Optimale Lösungen der verschiedenen Szenarien

	Anlagen-leistung	angeschlossene Haushalte	genutzte Wärme in Tausend kWh	Kapitalwert in Tausend €
Ist-Situation	125 kW	15	550	200
Szenario 1	275 kW	26	820	1390
Szenario 2	500 kW	27	2120	1780
Szenario 3	500 kW	30	2200	1720

Aber auch bei hoher Substratverfügbarkeit (Szenario 2) werden nicht alle potenziellen Wärmekunden angeschlossen, da bei einigen Haushalten der Kapitalwert geringer ist als die notwendigen Auszahlungen für den Anschluss an das Nahwärmenetz. Da jedoch nicht nur ökonomische Aspekte eine Rolle spielen und der Ausschluss von prinzipiell anschlusswilligen Haushalten negative Auswirkungen auf solch ein Projekt haben kann, wird im letzten Szenario überprüft, welchen ökonomischen Einfluss der Anschluss aller potenziellen Wärmekunden hat. Dabei kann festgestellt werden, dass sich die optimale Anlagenkapazität nicht verändert, sich aber der Wärmenutzungsgrad erhöht und der Kapitalwert lediglich um 60.000 € niedriger ist als bei der optimalen Lösung. Der Anschluss aller möglichen Wärmekunden hat in diesem Fall also im Vergleich zur Biomasseverfügbarkeit nur einen sehr geringen Einfluss auf den Kapitalwert.

3.2.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Inwieweit das entwickelte Modell bei der praktischen Begleitung von Bioenergiedorfprojekten eingesetzt werden kann, hängt von der Größe des aufzubauenden Energieversorgungssystems und von der Anordnung der Gebäude im Dorf ab. Bei sehr kleinen Dörfern mit wenigen Häusern oder in Dörfern, bei denen die Häuser vorwiegend entlang einer Straße liegen, könnte sich das Planungsproblem einfacher gestalten, so dass eine einmalige Machbarkeitsstudie für die Projektplanung unter Umständen ausreicht. Bei größeren Dörfern, wo es verschiedene Möglichkeiten der Netzverläufe und Anschlussdichte von Haushalten gibt, lässt sich das Modell jedoch sinnvoll einsetzen.

Im Modell können Unsicherheiten bisher nur durch Szenarienberechnungen berücksichtigt werden. Unterschiedliche Biomassepreise, Einspeisevergütungen,

Anlagenwirkungsgrade, Transportdistanzen und Substratzusammensetzungen wirken sich im Modell auf die Kapitalwerte der Anlagen aus. Ändern sich diese Werte, dann ändern sich damit auch die Parameter des Modells. Da bei der Kapitalwertmethode Zahlungsreihen über den gesamten Planungshorizont betrachtet werden, können über den Zeitablauf schwankende Zahlungsreihen erfasst werden. Damit verbunden ist allerdings das Problem, dass die Entwicklung bestimmter Zahlungsreihen (z.B. die rohstoffbezogenen Auszahlungen) teilweise nur schwer vorhersagbar ist. In der Sensitivitätsanalyse zu den Kapitalwerten der Biogasanlagen ist zu sehen, dass die Wirtschaftlichkeit der Anlagen stark von der Höhe des energetischen Wirkungsgrades der Anlage, der Einspeisevergütung für Strom und den Substratkosten abhängt. Aus diesem Grund sollten bei der Modellanwendung Ergebnisse für unterschiedliche Unsicherheitsszenarien berechnet werden. Diese Szenarien sollten nicht nur schwankende Biomassepreise, sondern auch die Unsicherheiten bei der Biomasseverfügbarkeit berücksichtigen. Ändern sich aufgrund klimatischer Entwicklungen die Niederschlagshäufigkeit oder die Bodenqualität, so können die sich verändernden Biomasseerträge mit dem Ertragsmodell BioSTAR berechnet werden (siehe Kap. 3.4) und als angepasste Parameter in das Modell einfließen. Dadurch können möglichst robuste Lösungen bezüglich der Biomasseverfügbarkeit berechnet werden. Auch angepasste Fruchtfolgen und dadurch veränderte Substratverfügbarkeiten können somit in das Modell und in die Szenarienbetrachtung einfließen. Damit kann das entwickelte Modell einen Beitrag dazu leisten, auf örtlicher Ebene kosteneffiziente, dezentrale Nahwärmekonzepte umzusetzen. Der Vorteil gegenüber konventionellen Machbarkeitsstudien liegt dabei in der Möglichkeit, veränderliche Rahmenbedingungen fortwährend in dem Modell abzubilden. Dadurch kann für unterschiedliche Anschlusswünsche der Haushalte oder Biomasseangebote der Landwirte jederzeit eine neue, ökonomisch optimierte Struktur des Bioenergiesystems ermittelt werden.

Literatur

Daub, A., Uhlemair, H., Ruwisch, V. & Geldermann, J. (2013). Optimising Bioenergy Villages' Local Heat Supply Networks. In: Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J. (Hrsg.): *Sustainable Bioenergy Production – An Integrated Approach* (Kapitel 8). Berlin/London/New York: Springer-Verlag.

EEG (2009). *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG)* vom 25. Oktober 2008. *BGBl. I,* S. 2074. Berlin: Bundesanzeiger Verlag.

EEG (2012). *Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromeinspeisung aus Erneuerbaren Energien* vom 28. Juli 2011. *BGBl. I,* S. 2730, Berlin: Bundesanzeiger Verlag.

Karschin, I. (2015). *Entwicklung eines Netzwerk-Standort-Modells für die ökonomische Optimierung lokaler Nahwärmesysteme.* Dissertation. 142 S., Göttingen: Cuvillier.

Karschin, I. & Geldermann, J. (2015). Efficient cogeneration and district heating systems in bioenergy villages: an optimization approach. *Journal of Cleaner Production* 104, 305-314.

KTBL (2006). *Energiepflanzen, KTBL-Datensammlung mit Internetangebot*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).

KTBL (2007). *Faustzahlen Biogas*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).

KTBL (2009). *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).

Ruppert, H., Eigner-Thiel, S., Girschner, W., Karpenstein-Machan, M., Roland, F. Ruwisch, V., Sauer, B., Schmuck, P. (2008). *Wege zum Bioenergiedorf" - Leitfaden für eine eigenständige Strom- und Wärmeversorgung auf Basis von Biomasse im ländlichen Raum*. 120 S., mit DVD, ISBN 978-3-9803927-3-0. Gesichtet am 30.4.2017: https://mediathek.fnr.de/downloadable/download/sample/sample_id/193/

Uhlemair, H. (2012). *Optimierung des Produktions- und Distributionssystems von Bioenergiedörfern*. Dissertation, Universität Göttingen.

Uhlemair, H., Karschin, I. & Geldermann, J. (2014). Optimizing the production and distribution system of bioenergy villages. *International Journal of Production Economics* , 147, 62-72.

Voß, S. (1990). *Steiner-Probleme in Graphen*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.

.

3.3 Pflanzenbauliche Optimierung und Umsetzung eines integrativen Energiepflanzenbaus

Marianne Karpenstein-Machan

3.3.1 Einleitung und Problembeschreibung

Wie aus vielen Studien hervorgeht, bietet der Energiepflanzenanbau auf dem Acker die größten Potenziale unter den biogenen Ressourcen. In Deutschland wurden 2016 auf ca. 1,45 Mio. ha Pflanzen für die Biogaserzeugung angebaut und auf 0,9 Mio. ha Pflanzen für Biodiesel und Bioethanol (FNR 2016). Bereits 2 Mio. ha Anbaufläche, die wir bereits heute um 0,35 Mio ha überschreiten, liefert 304 PJ Energie und rangiert damit nach Daten von Aretz und Hirschl (2007) deutlich vor den Waldrestholzpotenzial (250 PJ), dem Wirtschaftsdünger (92 PJ) und anderen biogenen Reststoffen. Nach Daten von FNR (2016) liegen die Energiepflanzenpotenziale sogar bei 740 PJ.

Aus der Retrospektive betrachtet galt es, dieses große Potenzial für die Bioenergienutzung zu erschließen, weshalb die Regierung das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2004 novellierte und die Konditionen für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen deutlich verbesserte. Hinzu kann, dass bis dato die Landwirtschaft durch Überproduktion geprägt war und ca. 10 % der Flächen stillgelegt waren.

Angeregt durch das EEG 2004 stieg der Anbau von Energiepflanzen in wenigen Jahren von 0,7 Mio. ha (hauptsächlich Rapsanbau für Biodiesel) auf 2,2 Mio. ha (= 18,6 % der Ackerfläche; davon 11,7 % für Biogaspflanzen) (Daten in Tab. 1-2).

Die Landwirtschaft als bedeutendster Landschaftsgestalter erfüllt über die Nahrungsmittel-, Futtermittel- und Energieerzeugung hinaus vielfältige Nutzungsansprüche der Gesellschaft, wie zum Beispiel der Erhalt der Biodiversität und das Naherholungsbedürfnis der Bevölkerung. Der massive Anstieg der Bioenergienutzung, mit der sehr einseitigen Ausdehung des Maisanbaus führte zu signifikanten negativen Auswirkungen auf Ökosysteme und Biodiversität (Rode & Kanning 2010) und zu Akzeptanzverlusten in der Gesellschaft (s. Kap.3.7). Es wird immer deutlicher, dass die landwirtschaftliche Nutzfläche begrenzenden Faktor ist, wenn alle Nutzungsansprüche der Gesellschaft für den Nahrungs-und Futtermittelbedarf, der Bedarf für Bioenergie und Grundstoffe für die Industrie gedeckt werden sollen. Hannah et al. weisen bereits 1994 darauf hin, dass global aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte die landwirtschaftliche Nutzung und diverse ökologische Leistungen auf der gleichen Fläche vereinigt werden müssten.

Grundsätzlich hat der Energiepflanzenanbau das Potenzial, die Fruchtfolgen zu bereichern und Landschaft diverser zu gestalten. Leider wird davon jedoch

noch nicht sehr viel Gebrauch gemacht. Eine von Karpenstein-Machan und Weber (2010) durchgeführte Befragung von Landwirten mit Biogasanlagen in Niedersachsen ergab, dass durch die Einbindung von Energiepflanzen bei 50 % der Betriebe die Anzahl von Kulturarten auf Betriebsebene von 3,5 auf 4 signifikant anstieg, jedoch bei 79 % der Betriebe der Humusreproduktionsbedarf um 91 kg C/(ha*a) zunahm. Besonders in Betrieben, wo bereits ohne Energiepflanzen ein hoher Anteil humuszehrender Kulturen angebaut wird, besteht die Gefahr, dass durch zusätzlichen Maisanbau die Humusbilanz nicht mehr ausgeglichen ist (s. auch Kap. 3.3.3).

Durch neue „Integrative Anbaukonzepte für Energiepflanzen" können negative Effekte der intensiven konventionellen Landwirtschaft auf Betriebs- und Landschaftsebene reduziert werden. Unsere Forschungsmotivation war daher:

Wie können integrative Anbaukonzepte in die landwirtschaftliche Praxis so einfließen, dass die Biomasseproduktion gleichzeitig einen Beitrag zur Biodiversität und der Erhaltung der Ökosysteme leisten, ohne die Nahrungsmittelproduktion qualitativ einzuschränken?

Da die Qualität der Fruchtfolge zugleich die Biodiversität und die ökologischen Leistungen maßgeblich beeinflusst, wurde in Beispielbetrieben die Einbindung alternativer Energiepflanzen in die Fruchtfolge getestet.

3.3.2 Methoden

3.3.2.1 Konzept des „Integrativen Energiepflanzenbaus"

Auf Betriebs- und Landschaftsebene sollen integrative Energiepflanzenbaukonzepte (IEPK) zu einer nachhaltigen und vielfältigen Landschaft beitragen. Der integrative Energiepflanzenbau soll die Nutzung der Landschaft mit dem Schutz der Landschaft enger verkoppeln, so dass beide Zielstellungen nicht konträr verlaufen, sondern durch innovative Anbaukonzepte beide Ziele auf der gleichen Fläche verwirklicht werden können. Integrativer Energiepflanzenbau kann z. B. auf Gunststandorten hohe Biomasseerträge konventionell und umweltfreundlich mit Misch- und Zweikulturnutzung erzeugen und in Form von biozidfreien Blühstreifen am Ackerrand in artenarmen Landschaften zur Biodiversität beitragen und das Landschaftsbild verbessern. Ebenso kann der Anbau von mehrjährigen Wildkräutermischungen als Biogassubstrat einen Beitrag zum Naturschutz und zur Bioenergiegewinnung leisten (Vollrath et al. 2011). Abbildung 3-7 zeigt ein theoretisches Modell, wie IEPK auf Betrieb- oder Landschaftsebene den Anbau von einjährigen und mehrjährigen Kulturen sowie den Anbau von Nahrung, Futter und Energie kombiniert (s. auch Karpenstein-Machan 2002).

Die typischen Biogaspflanzen Mais, Triticale und Roggen rotieren mit Winterweizen, Zuckerrüben und Feldgrass. Die Anfälligkeit der Pflanzen für Krankheiten ist in solchen diversen Fruchtfolgen geringer und Pestizide können eingespart werden. Triticale und Roggen werden bereits zur Milchreife geerntet und zur

Ganzpflanzensilage (GPS) verarbeitet, so dass auch hier weniger Pflanzenschutzmittel benötigt werden (Karpenstein-Machan 2001, 2002, Meissle et al. 2010). Durch die Integration von humusmehrenden Kulturen wie z. B. Ackergras kann der Humusgehalt trotz Biomasseabfuhr von Energiepflanzen gehalten werden.

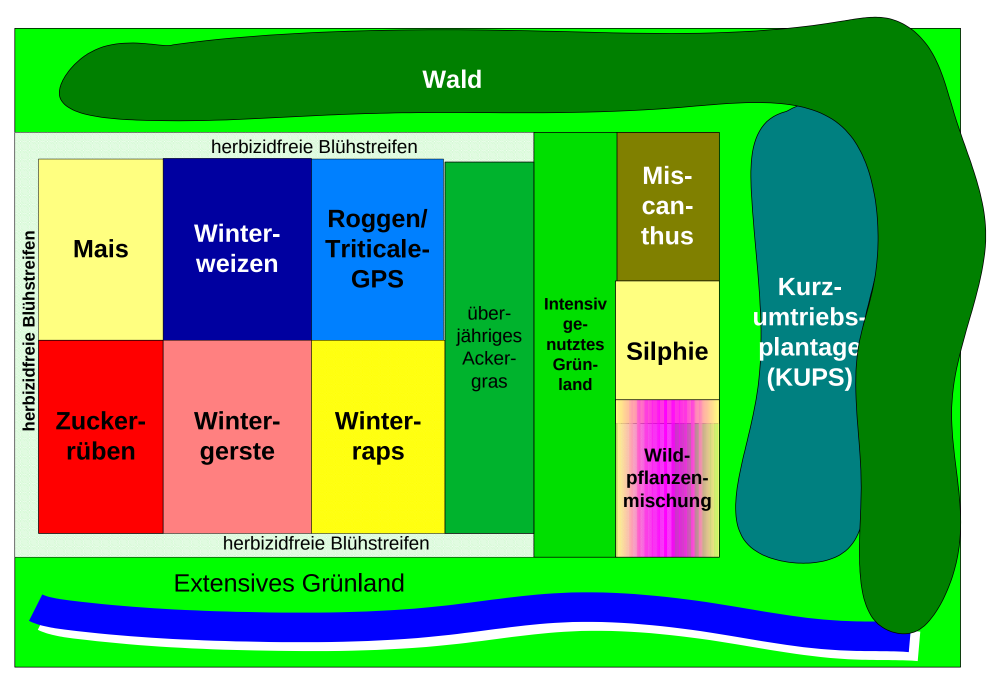


Abbildung 3-7: Model eines integrativen Anbaukonzeptes mit Nahrungsmittel-, Futtermittel- und Energiepflanzenanbau (Karpenstein-Machan 2004, verändert)

In einem theoretischen Beispiel sind die einjährigen Kulturen von herbizidfreien Blühstreifen umgeben. Diese können entweder mit der Biomasse zusammen geerntet werden oder auf dem Feld über Winter verbleiben, um für Wildtiere einen Schutz zu bieten. Dauerkulturen tragen ebenfalls zum Winterhabitat für Vögel und Wildtiere bei, sie benötigen nach der Etablierungsphase keine Pflanzenschutzmittel mehr und tragen bei zur Humusmehrung, zum Erosionsschutz und zur Wasserretention (ausgleichende Wirkung bei Hochwasser) (Börjesson 1999, Power 2010, Don et al. 2012). Dauerkulturen sind besonders sinnvoll auf ökologisch sensiblen Standorten, die zu Nitratauswaschung, Humusabbau und Erosion neigen. An Flussläufen, Waldrändern und Straßengräben sind Dauerkulturen wie *Miscanthus*, *Silphium perfoliatum*, Wildpflanzenmischungen und Kurzumtriebsplantagen eine produktive und ökologische Alternative zu einjährigen Intensivkulturen. Sie bedecken den Boden das ganze Jahr über, speichern CO_2 durch das Unterlassen der Bodenbearbeitung, und sie reduzieren Nährstoffauswaschungsprobleme (Börjesson 1999, Power 2010, Don et al. 2012).

Die Dauerkulturen können als Substrat für Biogasanlagen (Durchwachsene Silphie, Wildpflanzenmischungen, Grünlandschnitte) dienen, oder zur Wärmeproduktion genutzt werden (Miscanthus, Kurzumtriebsholz).

3.3.2.2 „On farm Research“

Im Rahmen des Aktionsforschungsprojektes „Pflanzenbauliche Optimierung und Umsetzung eines integrativen Energiepflanzenbaus“ arbeiteten wir mit drei Landkreisen und mit drei landwirtschaftlichen Betrieben zur Umsetzung des integrativen Energiepflanzenbaus zusammen. Die Landwirte testeten vorgeschlagene neue Kulturen und Anbaukonzepte, die ihren Anbau ökologisch und ökonomisch optimieren sollen. Die Idee ist, dass ausgehend von diesen Betrieben neue wissenschaftliche Ansätze auf andere Betriebe übertragen werden. Um dies zu befördern, fanden regelmäßige Feldführungen auf den sogenannten Modellbetrieben statt.

3.3.2.3 Getestete Kulturen auf den Modellbetrieben

Auf den Modellbetrieben im Landkreis Goslar, Landkreis Wolfenbüttel und der Region Hannover wurden von 2009 bis 2013 Anbauversuche mit verschiedenen Kulturarten durchgeführt. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebisse vorgestellt.

Zweikulturnutzung: Wintergetreide und nachfolgende Sommerung

Als Erstkultur wurde ein Mischanbau bestehend aus Wintertriticale (*Triticosecale*) und Winterwicke (*Vicia villosa*) bzw. Winterroggen (*Secale cereale*)/Winterwicke getestet. Diese Mischungen werden bereits von Züchtern für die Praxis angeboten. Es werden standortübliche Saatstärken für das Getreide gewählt und die Winterwicke mit 10 kg/ha zugemischt. Die Winterung wird im Stadium Milch-/Teigreife geerntet (auf den Betrieben Anfang bis Mitte Juli – im Folgenden als Wintergetreide-GPS bezeichnet), so dass Zeit für eine Zweitfrucht gegeben ist. Verschiedene Zweitkulturen wurden getestet: Sonnenblumen (*Helianthus annuus L.*), Sudangras (*Sorghum bicolour x sudanens*), Amaranth (*Amaranthus spp.*), Ölrettich (*Raphanus sativus L.*), Buchweizen (*Fagopyrum esculentum*), Sommertriticale (*Triticosecale*), Sommerhafer (*Avena sativa*). Die Form der Zweikulturnutzung lässt sich idealerweise in die Fruchtfolge integrieren, trägt zur Diversifizierung der Rotationen bei und ist in der Summe im Ertrag dem Mais ebenbürtig (Stülpnagel et al. 2007). Nach Wintergetreide-GPS kann auch Ackergras folgen, welches dann einmal im Herbst und ein zweites Mal im Frühjahr als Energiepflanze oder Futter genutzt werden kann. Dies trägt stärker zur Humusmehrung bei als dikotyle Sommerzwischenfrüchte. Auch eine Einbindung des Wintergetreide-GPS in eine Rapsfruchtfolge ist möglich, da die frühe Ernte des Getreides zur Biogasnutzung eine zeitgerechte Rapsaussaat ermöglicht.

Mais mit Untersaat

Rotschwingel (Festuca rubra L.) und Weidelgras (Lolium multiflorum L.) wurden als Untersaaten unter Mais getestet. Rotschwingel wurde bereits mit der Bodenbearbeitung vor der Maisaussaat gesät, während Weidelgras aufgrund seiner höheren

Konkurrenzkraft erst drei Wochen nach der Maisaussaat gesät wurde. Gut etablierte Untersaaten erhöhen den Humusgehalt des Bodens und sind besonders bei engen Maisfruchtfolgen unerlässlich. Sie tragen zum Erosionsschutz bei. Während Rotschwingel als Humusquelle und Erosionsschutz dient, kann das produktivere Weidelgras im Frühjahr noch einen lohnenswerten Biomasseschnitt für die Biogasanlage liefern.

Blühstreifen um Mais

Um die Akzeptanz für Energiepflanzen zu verbessern und gleichzeitig die Artenvielfalt mit spätblühenden Kulturen als Nektar für Bienen und Insekten zu erhöhen, wurden 3 m breite Sonnenblumenstreifen bzw. einjährige Wildpflanzenblühstreifen (Zeller Saaten) um Maisfelder angelegt. Die Blühstreifen werden erst nach der Maisaussaat und der Herbizidbehandlung Anfang bis Mitte Juni gesät. Zur Vorbereitung der Saat des Blühstreifens wird eine zweimalige Bodenbearbeitung durchgeführt, um aufgelaufene Unkräuter zu beseitigen und der Blühmischung optimale Startbedingungen zu geben.

Dauerkulturen (Silphie und Wildpflanzenmischung)

Als neue Dauerkultur, die in Deutschland zurzeit auf ca. 25 ha auf Praxisbetrieben erprobt wird, wurde die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum L.*) auf zwei Standorten (Lößlehm und ein flachgründiger Karstboden) ausgepflanzt. Die Silphie, auch Becherpflanze genannt, kann über 10 bis 15 Jahre genutzt werden (Conrad & Biertümpfel 2010). In ihren becherartigen Blättern kann sie Tau- und Regenwasser speichern und ist deshalb relativ trockenresistent. Ihre Heimat ist Nordamerika und sie ist an ein gemäßigtes Klima wie auch moderate Höhenlagen angepasst.

In zwei der kooperierenden Betriebe wurde Silphie auf 0,5 bzw. 1,9 ha mit einer Gemüsepflanzmaschine im Juni 2010 bzw. 2011 ausgepflanzt. Die Pflanzstärke betrug vier Pflanzen/m^2. Silphie wurde zuvor gewerbsmäßig in einem Gewächshaus der Firma „Chrestesen Saaten“ angezogen und im Drei- bis Vier-Blattstadium an die Betriebe ausgeliefert. Die geringe Keimfähigkeit der Samen der Silphie führt bei Aussaat noch nicht zu einer befriedigenden Bestandesdichte. Erste erfolgreiche Tests mit chemisch behandeltem Saatgut machen jedoch Hoffnung auf eine baldige Verfügbarkeit von Saatgut mit guter Keimfähigkeit (Conrad & Biertümpfel 2013). Die Silphie wurde mit 20 m^3 Gärrest/ha gedüngt und im 1. Jahr der Etablierung mehrmals manuell gehackt. Vorteil der Dauerkultur ist, dass ab dem 2. Jahr weder Unkrautkontrolle noch Bodenbearbeitung notwendig sind.

Auf einer anderen Fläche des Betriebes 2 wurde im Mai 2011 auf 0,7 ha eine mehrjährige Wildpflanzenmischung für Biogas der Firma „Zeller Saaten“ ausgesät, die in Zusammenarbeit mit dem Netzwerk „Lebensraum Brache“ entwickelt wurde. Diese Mischung besteht aus 24 Wildarten und wurde nach ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zusammengestellt. Ein möglichst hoher Ertrag und eine lange Blühdauer des Bestandes sollen erreicht werden, um den Anbau sowohl für den Landwirt attraktiv zu machen, als auch als Bienen- und Insektenweide die

Landschaft ökologisch aufzuwerten. Die Mischung wurde mit 10 m^3 Gärrest gedüngt.

Boden- und Pflanzenanalysen

Unter der Dauerkultur Silphie sowie unter einjährigen Referenzkulturen (Mais, Zuckerrüben) wurden seit 2011 in der Vegetationszeit Mai bis Oktober Bodenproben bis 30 cm Tiefe gezogen, um die Entwicklung des Humusgehaltes (C- und N-Gehalt in 0-15, 15-30 cm) zu untersuchen. Die Beprobungspunkte wurden mit einen GPS-Gerät gespeichert, so dass immer wieder die gleichen Standorte für die Probenahme aufgesucht werden können. Zur Analyse des zeitlichen Wachstums und der Entwicklung der Silphie wurden monatlich Pflanzenproben im Silphiebestand mit vierfacher Wiederholung entnommen. Es wurden zwei Standorte beprobt (Betrieb 1: Karstboden, Betrieb 2: Lösslehm).

3.3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.3.1 Charakterisierung der Betriebe

Tabelle 3-7 gibt einen Überblick über die Betriebsart, die klimatischen Bedingungen, die Bodeneigenschaften und Fruchtfolgen der drei Modellbetriebe. Die beiden Ackerbaubetriebe und der milchviehhaltende Betrieb wirtschaften unter unterschiedlichen Standort- und Klimabedingungen in Südniedersachen. Alle drei Betriebe besitzen Biogasanlagen bzw. sind Teilhaber an einer Biogasanlage. Während sich jährliche Niederschläge und die Jahresdurchschnittstemperatur nur moderat auf den Standorten der Betriebe unterscheiden, wird die sehr unterschiedliche Ertragsfähigkeit der Böden anhand der Ackerzahlen der Betriebe und Bodenarten deutlich (s. Tabelle 3-7). Alle drei Betriebe weisen sehr enge Fruchtfolgen auf; die am häufigsten angebauten Kulturen sind Mais, Winterweizen und Zuckerrüben. Betrieb 1 produziert Marktfrüchte und Energiepflanzen auf Standorten mit geringer bis hoher Bodengüte (Ackerzahlen 35 bis 82). Ein großer Teil der Böden hat sich auf Karstgestein entwickelt und sind reich an Kalksteinen und sehr flachgründig. Daneben kommen noch tiefgründigere sandige Lehme und Lehmböden mit höherer Bodenfruchtbarkeit vor. Die Karststandorte gehören seit mehr als 10 Jahren zum Wasserschutzgebiet. Die wichtigste Kultur stellt für den Betrieb 1 der Mais dar; er wird auf 65 % der Fläche kultiviert. Daneben werden noch Zuckerrüben, Winterweizen und Winterroggen angebaut. Während Zuckerrüben mit Winterweizen und Winterroggen rotiert, wird Mais meistens auf den Karstböden in Monokultur angebaut.

Betrieb 2 produziert Marktfrüchte und Energiepflanzen auf sehr fruchtbaren Mineral- und Niedermoorböden. Seit 60 Jahren werden die Niedermoorböden ackerbaulich bewirtschaftet. Aus ehemals feuchtem Grünland wurde durch Drainierung und Pflügen Ackerland gewonnen. Diese Landnutzungsänderung geht einher mit hohen Mineralisationsraten, Humusabbau und hohen CO_2-Emissionen.

Die auf den Niedermoorböden angebauten Kulturen sind aufgrund der hohen Mineralisationsraten mit Nährstoffen überversorgt (insbesondere Stickstoff). Das begünstigt Pflanzenkrankheiten, Lager im Getreide und einen hohen Unkrautdruck und erfordert einen hohen Einsatz an Pflanzenschutzmitteln. Der Winterweizen (WW) wird auf Betrieb 2 auf 53 % der Fläche angebaut. WW rotiert auf den Mineralböden mit Zuckerrüben (WW-WW-ZR) und Mais wird auf den organischen Böden im Wechsel mit Sommerweizen (SW) angebaut (Mais-Mais-(Mais)-SW). Der Sommerweizen wird deshalb gewählt, da der Winterweizen auf den organischen Böden auswinterungsgefährdet ist.

Tabelle 3-7: Betriebsart, Klima, Bodenart und Fruchtfolgen der drei Modellbetriebe vor der Umstellung

	Betrieb 1	**Betrieb 2**	**Betrieb 3**
Betriebstyp	Ackerbaubetrieb mit Biogas;	Ackerbaubetrieb mit Biogas;	Milchfarm mit Biogas; Acker- und Grünland
Langjährige Klimadaten	8,0 ° C, 720 mm	9,0 ° C, 600 mm	9,2 ° C, 670 mm
Bodenarten	Sandiger Lehm, Lehm, flachgründige Karstböden	Lößlehm und organische Böden	Sandiger Lehm und Sand
Ackerzahl	32-82	50-100	30-50
Kulturarten in % des Ackerlandes	Silomais 65 % Z.Rüben 15 %; W.Roggen 13 %; W.Weizen 7 %	Wi.Weizen 53 %; Z.Rüben 28 %; Silomais 10 %; S.Weizen 6 %, W.Roggen 3%	Silomais 63 %; W.Triticale 20%; W.Weizen 17 %

Der Milchviehbetrieb (3) produziert hauptsächlich Futter auf Grünland und Ackerland (Mais) und Energiepflanzen (Mais) auf Ackerland. Die Bodenarten variieren zwischen Sand- und lehmigen Sand. Große Teile der Anbauflächen liegen im Wasserschutzgebiet. Da der Betrieb sowohl für die Milchkühe als auch für die Biogasanlage Mais benötigt, wächst dieser aud ca. 63 % der Flächen. Zum Teil rotiert der Mais mit Wintertriticale und Winterweizen; auf anderen Flächen wird Mais in Monokultur angebaut.

3.3.3.2 Analyse der Problemlage der Betriebe

Die Fruchtfolgen und Produktionsweisen der Betriebe wurden durch Datenbereitstellung und Gespräche mit den Betriebsleitern ermittelt mit dem Ziel, mögliche Wirkungen des Landmanagements auf die Umwelt abzuleiten. Für die Fruchtfolgen der Betriebe wurden nach VDLUFA (2004) Humusbilanzen erstellt. Böden und Klima wurden gemäß ihren Eigenschaften (Bodenwasserspeicherkapazität,

Wasserdefizit im Sommer) und des Gefährdungspotenzials für Nitratauswaschungen und Bodenverdichtung nach dem Niedersächsischen Bodeninformationssystem (NIBIS) bewertet. Die Anzahl der angebauten Kulturen auf einen Standort ist ein wichtiger Indikator, um die Auswirkungen der landwirtschaftlichen Produktion auf die floristische und faunistische Biodiversität zu beurteilen. Je geringer die Anzahl der Kulturen in einer Rotation ist, desto negativer sind die Umwelteffekte (Wiehe et al. 2010a, Power 2010).

Tabelle 3-8 zeigt, vor welchen Herausforderungen die Betriebe stehen. Durch die einseitigen Fruchtfolgen mit wenigen Kulturarten - auf manchen Standorten sind nur eine Kulturart oder humuszehrende Fruchtfolgen - können viele Probleme, wie Humusabbau, Bodenverdichtung und Nitratauswaschung erwachsen. Mit Mais und Zuckerrüben stehen in Betrieb 1 zwei humuszehrende Kulturen in einer Fruchtfolge. Um den in weiten Reihen stehenden Jungpflanzen keine Konkurrenz erwachsen zu lassen, werden wachstumsbeeinträchtigende Unkräuter durch Herbizide oder durch Hacken beseitigt. Der weitgehend unbedeckte Boden zu Beginn des Wachstums, die lange Vegetationszeit bis in den Herbst hinein sowie die geringen Mengen an Ernterückständen führen zu einem starken Humusabbau nach dem Mais- und Zuckerrübenanbau. Die Humuszehrung muss in der Fruchtfolge durch humusmehrende Kulturen, eventuell ergänzt durch eine organische Düngung, ausgeglichen werden. In Betrieb 2 führt der häufige Anbau von Mais auf den Niedermoorböden zu sehr starkem Humusabbau und enormen Treibhausgasemissionen (Jungkunst et al. 2010, Elder & Lal 2008, Wegener et al. 2006).

Auf allen drei Betrieben treten Schädlinge und Krankheiten auf, die insbesondere durch die engen Fruchtfolgen bzw. die Monokulturen begünstigt werden (Meissle et al. 2010). Betrieb 1 und 2 haben Probleme mit dem Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*). Betrieb 2 hat aufgrund der engen Zuckerrübenfolgen Probleme mit Rübennematoden (*Heteroda schachtii*).

Zuckerrüben und Mais werden im Herbst mit schweren Maschinen geerntet, oft unter ungünstigen Wetterbedingungen, was zu Bodenverdichtungen führen kann. Die lehmreichen und organischen Böden der Betriebe 1 und 2 neigen stärker zu Bodenverdichtungen und sind daher stärker gefährdet als Betrieb 3.

Die Gefahr der Nitratverlagerung ist auf den Karstböden des Betriebs 1 und auf den Sandböden des Betriebs 3 besonders hoch. Alle Betriebe wirtschaften konventionell und setzen Pestizide vorbeugend und kurativ gegen Unkräuter, Schädlinge und Pflanzenkrankheiten ein. Auf den organischen Böden des Betriebs 2 ist ein hoher Einsatz an Pestiziden notwendig, da aufgrund einer sehr hohen Mineralisationsrate die Pflanzen mit Nährstoffen überversorgt sind (insbesondere Stickstoff) und daher sehr anfällig für Krankheiten und Schädlinge sind. Auch der Unkrautdruck ist auf den Niedermoorböden sehr stark.

Das Wasserdefizit im Sommer ist auf Betrieb 2 am höchsten, aber die fruchtbaren Lehm- und Niedermoorböden haben eine höhere Wasserspeicherkapazität im Vergleich zu den Sandböden des Betriebes 3. Betrieb 1 hat ein geringeres Was-

serdefizit im Sommer, aber auf den Karstböden ist die Wasserspeicherkapazität auch sehr niedrig und Frühsommertrockenheit kann zu Ertragseinbußen führen.

Tabelle 3-8: Analyse und Bewertung der wichtigsten ökologischen Probleme der drei Betriebe

Parameter	Betrieb 1	Betrieb 2	Betrieb 3
Fruchtfolge	2 bzw. 3 Kulturarten/Fruchtfolge	2 bzw. 1 Kulturart/Fruchtfolge	3 bzw. 1 Kulturart/Fruchtfolge
Humus	Humuszehrende Fruchtfolgen (-604 kg C/ha/a im Mittel der FF)	Humuszehrende Fruchtfolgen (-151 kg C/ha/a im Mittel der FF)	Humuszehrende Fruchtfolgen (-438 kg C/ha/a im Mittel der FF)
Krankheiten, Schädlinge	Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*) in Silomais	Rübennematode (*Heterodera schachtii*); hoher Unkraut- u. Krankheitsdruck auf organ. Böden	Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*) und Fusarium im Silomais
Bodenverdichtung	Mittlere bis hohe Gefahr	Hohe bis sehr hohe Gefahr	Geringe Gefahr
Nitratauswaschung	hohe Gefahr auf Karstböden	Geringe Gefahr	Hohe Gefahr auf Sandböden
Wasserdefizit im Sommer	-63 to -5 mm	-120 to -180 mm	-130 to -84 mm
Bodenwasserspeicherkapazität	Gering bis mittel	Hoch	Gering bis mittel

Um die spezifischen Probleme in den kooperierenden Betrieben zu lösen, wurde eine Vielzahl von Kulturen, insbesondere als Alternativen zum Maisanbau auf Standorten der Betriebe getestet. Die Kulturen wurden so ausgewählt, dass sie die Fruchtfolgen erweitern, das Humusdefizit ausgleichen, die Bodenstruktur verbessern, Bienen und Insekten Nahrung im Spätsommer geben und Wildtieren über Winter Schutz bieten.

3.3.3.3 Ergebnisse der Feldversuche

Als wichtigste Verbesserung der ökologischen Situation der Betriebe wird eine weitere Fruchtfolge mit erhöhter Artenanzahl angesehen. Um dies zu erreichen, wurden Kulturarten getestet, die bisher nicht im Betrieb angebaut wurden und ebenfalls zur energetischen Nutzung geeignet sind.

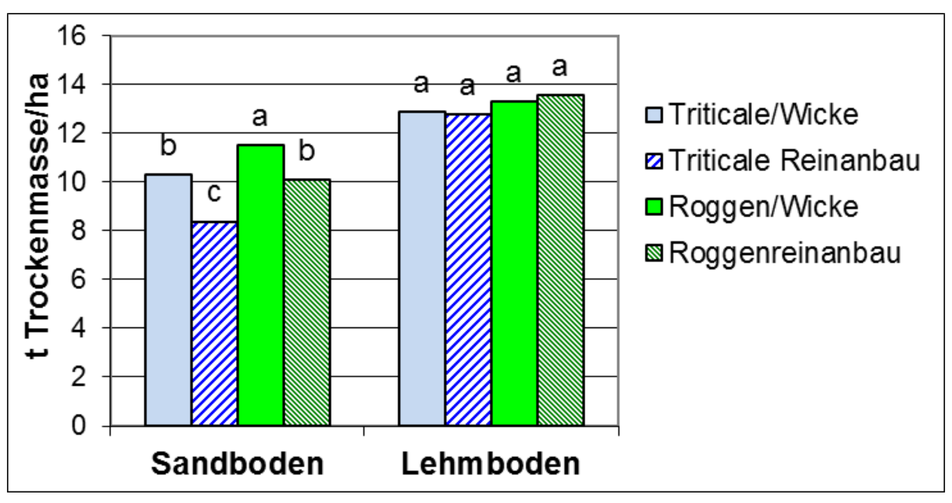


Abbildung 3-8: Biomasseertrag von Wintertriticale und Winterroggen in Reinsaat und in Mischung mit Winterwicke auf einem Sand- und einem Niedermoorboden im Mittel der Jahre 2011 und 2012. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Erträgen (Tukey test p<0,05).

Wintergetreidemischungen

Abbildung 3-8 zeigt die Erträge von Wintertriticale und Winterroggen im Reinanbau sowie der Mischungen Winterwicke/Wintertriticale und Winterwicke/ Winterroggen auf den Betrieben 2 (Lösslehm) und 3 (Sand). Auf dem Lößlehmboden in Wolfenbüttel werden signifikant höhere Erträge erzielt als auf dem Sandboden in der Region Hannover. Interessant ist, dass auf dem fruchtbaren Boden sowohl die Reinsaaten als auch die Mischungen nahezu den gleichen Ertrag erzielen. Die Winterwicken wurden durch das üppige Wachstum des Getreides in den Mischungsvarianten stark unterdrückt, so dass ihr Biomasseanteil am Gesamtertrag sehr gering war. Auf dem Sandboden zeigt sich ein anderes Bild. Die Mischungen sind ertraglich den Reinsaaten überlegen und die Winterroggen/Winterwicke-Mischung ist der Wintertriticale/Winterwicke-Mischung signifikant überlegen. Auf diesem Standort mit geringer Wasserspeicherkapazität war die Frühsommertrockenheit für Triticale ertragsbegrenzend. Winterroggen konnte aufgrund seiner höheren Trockenheitstoleranz den höheren Biomasseertrag erbringen. Offensichtlich ist das Getreide in der Mischung mit Winterwicke noch eher in der Lage, das Wasser tieferer Bodenschichten zu erschließen bzw. negativ wirkende Umwelteffekte abzumildern und den Ertrag zu stabilisieren (Aufhammer 1999, Karpenstein-Machan & Finckh, 2002). Vergleicht man den durchschnittlichen Maisertrag im Jahre 2011 mit den Wintergetreidebiomasseerträgen (GPS), so lagen die Maiserträge im Betrieb 2 auf den fruchtbaren Böden ca. 20 % und in Betrieb 3 auf den Sandböden ca. 25 % über den Wintergetreide-GPS-Erträgen.

Zweikulturnutzung

Zweikulturnutzung ist auf fruchtbaren Standorten eine ideale Möglichkeit, hohe Erträge mit hoher Biodiversität und geringer Erosion zu verbinden. Nach dem Anbau von Wintergetreide (zur Nutzung als Ganzpflanzensilage –GPS) das im Zeitraum Anfang bis Mitte Juli geerntet wird, kann eine zweite Kultur im gleichen Jahr angebaut werden, die ebenfalls noch als Biomassekultur im Herbst geerntet werden kann. Je nach Entwicklungsgeschwindigkeit der zweiten Kultur kann sie als Substrat für die Biogasanlage oder als Gründüngung zur Verbesserung der Humusgehaltes Verwendung finden.

Abbildung 3-9 zeigt die Trockenmasseerträge und die Trockenmassegehalte der getesteten Sommerkulturen, die um den 20. Juli kurz nach der Ernte der Winterungen (Wintergetreide-GPS) gesät und Mitte Oktober zusammen mit dem Mais geerntet wurden.

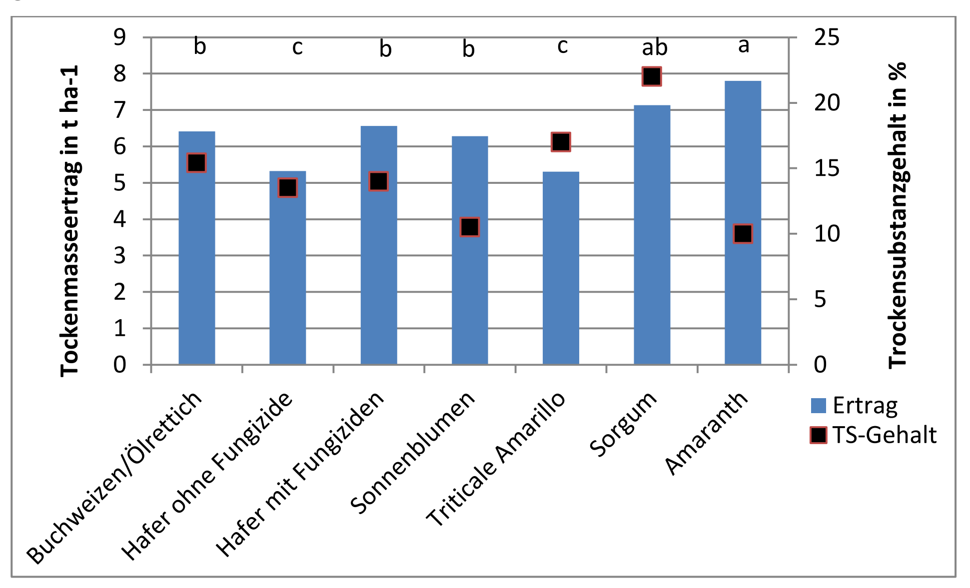


Abbildung 3-9: Trockenmasseerträge (Säulen) und Trockenmassegehalte in % (Punkte) von Sommerkulturen nach Wintergetreide-GPS auf einem Niedermoorstandort im Mittel der Jahre 2011 und 2012. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in den Erträgen (Tukey test $p<0,05$).

Die Erträge der Sommerungen liegen zwischen 5 t bei Hafer (ohne Fungizide) und 8 t Trockenmasse pro ha bei Amaranth. Nur bei Hafer wurde ein Fungizid eingesetzt, da diese Kultur auf Niedermoorstandorten bei hoher N-Verfügbarkeit sehr unter Krankheiten leidet. Aus Umwelt- und Kostengründen sollten jedoch in den Zweitkulturen keine Pestizide eingesetzt werden und die weniger krankheitsanfälligen Arten wie Buchweizen/Ölrettichmischungen als Zwischenfrüchte oder Sonnenblumen und Sorghum als Zweitfrüchte gewählt werden. Abbildung 3-9 zeigt auch die Trockensubstanzgehalte, die zwischen 10 % (Amaranth) und 23 %

(Sorghum) liegen. Die Arten mit sehr niedrigen Trockensubstanzgehalten eignen sich als Gründüngung, sie liefern einen wichtigen Beitrag zur Humusreproduktion in den Betrieben. Sorghum weist die höchsten Trockensubstanzgehalte, hier käme auch eine Biomasseernte in Frage. Durch gemeinsames Einsilieren mit trockeneren Kulturen (z.B. Mais) sollten jedoch die Sickersaftverluste vermieden werden. Der Zweikulturanbau erweitert in den Betrieben die enge Maisfruchtfolge, erhöht die Artenvielfalt und bereichert im blütenarmen Spätsommer mit Blühkulturen wie Buchweizen, Ölrettich und Sonnenblumen die Landschaft. Mit jeder neuen Kultur, die in die Fruchtfolge integriert wird, erhöht sich die floristische und faunistische Biodiversität (Murphy et al. 2006).

Untersaaten im Mais

Untersaaten im Mais verbessern die Humusbilanz in humuszehrenden Fruchtfolgen und schützen den Boden vor Bodenerosion. Abbildung 3-10 zeigt eine gelungene Untersaat im Mais mit Rotschwingel. Der Rotschwingel wächst sehr langsam unter dem Maisbestand und ist aufgrund seines zarten oberirdischen Wuchses keine Konkurrenz für den Mais. Sein üppiges Wurzelwachstum trägt zur Humusanreicherung bei. Nach der VdLUFA (2004) beträgt die Humusreproduktionsleistung durch Untersaaten 200-300 kg C/ha. Die Untersaat wächst nach der Maisernte weiter, bedeckt den Boden über Winter und schützt ihn vor Bodenerosion.



Abbildung 3-10: Rotschwingeluntersaat im Mais

Silphium perfoliatum L.

Erste Ergebnisse wurden erzielt zum Wachstum und den ökologischen Effekten der Dauerkultur Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*). Nach der Auspflanzung im Mai/Juni bildet die Silphie im ersten Jahr lediglich eine Blattrosette, die Blätter sind allerdings dann schon so groß, dass der Boden vor dem Winter schon vollständig bedeckt ist. Abbildung 3-11a zeigt einen Acker mit Silphie im Oktober,

5 Monate nach der Pflanzung. In diesem Entwicklungszustand geht sie in den Winter, die Blätter sterben ab und im Frühjahr des nächsten Jahres wachsen aus dem Vegetationstrieb neue Blätter, die mit dem Haupttrieb sehr schnell in die Höhe wachsen (Abbildung 3-11b).




Abbildung 3-11a/b: Durchwachsene Silphie im Rosettenstadium im Herbst 2010, 5 Monate nach der Pflanzung (links) und kurz vor der Ernte im Sept. 2012 (rechts)

Mitte September fand dann auf beiden Betrieben die Ernte der Silphie statt. Abbildung 3-12 zeigt anhand von Zeiternten das Wachstum von Silphie von Mais bis September auf zwei Standorten. Auf dem Karstboden steht die Silphie im zweiten und auf dem Lößlehmboden im dritten Vegetationsjahr nach der Pflanzung. Auf dem fruchtbareren Standort zeigt Silphie höhere Zeiternteerträge, auch zur Ernte wird mit 14 t Trockenmasse/ha ein höherer Ertrag im 1. Erntejahr erreicht als auf dem Karststandort mit 10 t Trockenmasse/ha. Auf dem Lösslehmstandort erreichte die Silphie im ersten Erntejahr mit 13,5 t Trockenmasse/ha einen etwas geringeren Biomasseertrag als im zweiten Erntejahr. Auch die Erträge auf dem fruchtbaren Lösslehmstandort bleiben etwas unter den Erwartungen. Nach Conrad et al. (2009) können auf fruchtbaren Standorten 20 t Trockenmasse/ha in Mitteldeutschland erreicht werden.

Die Durchwachsene Silphie blieb auf beiden Betrieben mit 20 bzw. 30 % unter den Maiserträgen. Sie muss jedoch nicht direkt mit Mais konkurrieren, da sie im Vergleich zum Mais einige Vorteile aufweist. Im Bestand der Silphie sind im Gegensatz zum Mais keine Wildschweinschäden aufgetreten und sie kann als Dauer-

kultur wesentlich extensiver bewirtschaftet werden. Nach der Etablierungsphase im ersten Jahr sind in beiden Betrieben keine Pflanzenschutzmittel mehr eingesetzt worden. Durch die wegfallende Bodenbearbeitung wurde der Kohlenstoffgehalt im Boden um 2 g C/100 g Boden m Vergleich zur Referenzkultur Mais erhöht (3. Standjahr der Silphie). Dies entspricht einer C-Akkumulation in der Bodenschicht 0-30 cm von 4,5 t/ha. Darüber hinaus erhöht die Silphie die Biodiversität des Betriebes und dient mit ihrer langanhaltenden Blüte bis in den Herbst hinein den Bienen als Nahrung. Besonders auf Niedermoorböden sind Dauerkulturen wie Silphie eine Alternative zum Maisanbau, da sie dem Humusabbau auf diesen ackerbaulich genutzten Böden durch Kohlenstoffakkumulation entgegenwirken können. Weitere Untersuchungen sind abzuwarten, ob die Etablierung der Silphie auf diesen Standorten mit ihrem hohen Stickstoffnachlieferungspotenzial langfristig möglich ist.

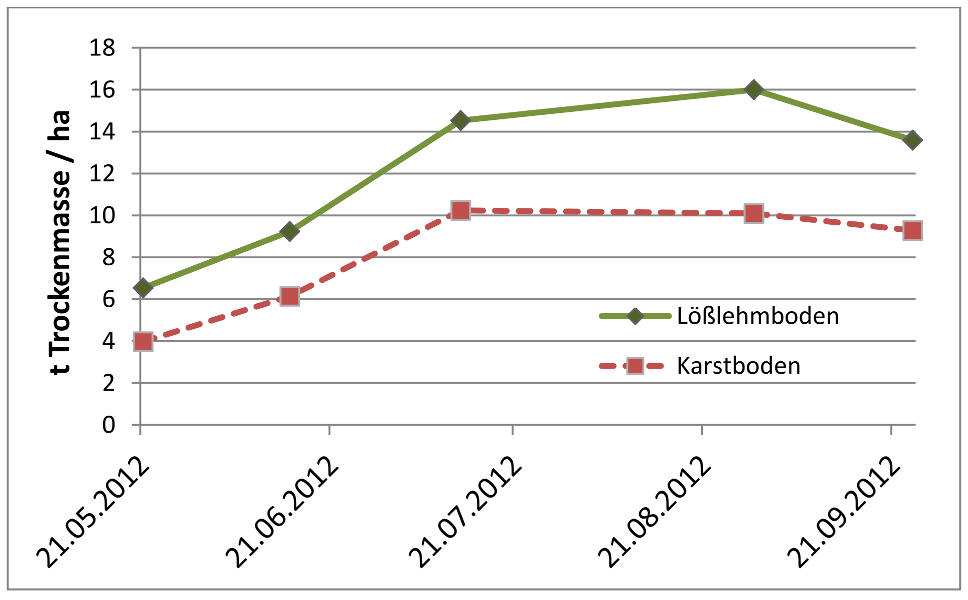


Abbildung 3-12: Trockenmasseentwicklung von der Durchwachsenen Silphie auf zwei Standorten in 2012

Wildpflanzenmischungen

Die mehrjährige Wildpflanzenmischung „Zeller Saaten" entwickelte sich nach der Saat Mitte Mai 2011 nach langer Trockenheit sehr zögerlich. Erst im Spätsommer wurde ein geschlossener Bestand erreicht. Bestandsbildend waren im ersten Jahr hauptsächlich Sonnenblumen und verschiedene Malvenarten. Im zweiten Jahr kamen dann die zwei- und mehrjährigen Arten zum Tragen (Abb. 3-13). Sehr positiv wahrgenommen wurde der blütenreiche Bestand durch Spaziergänger. Der Biomasseertrag lag im ersten Jahr bei 5,5 t und im zweiten Jahr bei 4,6 t Trockenmasse/ha. Der Bestand wurde in beiden Jahren Mitte September geerntet und

erreichte mit ca. 28 % Trockenmasse die Siloreife. Die Mischung wurde gezüchtet, um ökologische und ökonomische Ziele in der Biogasproduktion zu vereinen (Vollrath et al. 2011). Die langanhaltende Blütedauer, hervorgerufen durch die Vielzahl der Arten in der Mischung mit unterschiedlichem Entwicklungsrhythmus, ist eine Bereicherung des Landschaftsbildes. Die Erträge liegen allerdings auf einem relativ geringen Niveau. Der extensive Anbau und die geringen Bewirtschaftungskosten (Saatgut ca. 330 €/ha) sowie die langjährige Nutzungsdauer (> 5 Jahre, Vollrath et al. 2011) machen beim derzeitigen Ertragsniveau die Mischung interessant für z.B. betriebsferne oder schwer zugängige Standorte oder Flächen, die sich aufgrund der Bodenverhältnisse schwer bewirtschaften lassen oder ungünstig zugeschnitten sind. Auf dem Praxisbetrieb wurde die Mischung auf einer langgezogenen Dreiecksfläche angelegt, die direkt an einen stillgelegten Bahndamm anschloss. Dies ist ein gutes Beispiel für eine optimale Biotopvernetzung mit vorhandenen Flächen, auf denen keine Nutzung stattfindet.



Abbildung 3-13: Wildpflanzenmischung für Biogas „Zeller Saaten" im August 2012 im zweiten Vegetationsjahr

Abbildung 3-14: Drei Meter breiter Blühstreifen mit Sonnenblumen entlang des Maisfeldes

Blühstreifen

Als ein zusätzliches Strukturelement in der Agrarlandschaft können Sonnenblumen- oder Wildpflanzenblühstreifen den Maisanbau bereichern (s. Abbildung 3-14). Die Sonnenblumen und die Wildpflanzen wurden auf den Betrieben zwei Wochen nach der Maisaussaat gesät, da sie empfindlich auf Maisherbizide reagieren. Sie wurden zusammen mit dem Mais im Oktober geerntet und lagen im Biomasseertrag ca. 20 % unter dem sehr hohen Maisertrag (19 t TM/ha). Die Wildpflanzenblühstreifen lagen mit 6 t Trockenmasse pro ha deutlich unter den Mais- und Sonnenblumenerträgen. Blühstreifen können durch ihre schöne Blüte eine Brücke schlagen zwischen Biomasseproduktion und ästhetischen Aspekten der Landschaftsgestaltung.

3.3.3.4 Optimierung der Fruchtfolgen und ökonomische Bewertung

Allen drei Landwirten der Modellbetriebe wurden auf Basis der durchgeführten Versuche Vorschläge unterbreitet, wie sie ihre Fruchtfolgen pflanzenbaulich und naturschutzfachlich optimieren können, um die Ertragsfähigkeit ihrer Böden langfristig zu sichern. Bei der Optimierung wurde besonders auf eine ausgeglichene Humusbilanz und eine Diversifizierung des Anbaus geachtet sowie darauf, Naturschutzziele mit dem Anbau von Energiepflanzen zu verbinden. Auf ökologisch sensiblen Flächen, wie Karst- und Niedermoorstandorten wurden zum Teil Dauerkulturen als Ersatz für Mais vorgesehen.

Tabelle 3-9 zeigt beispielhaft für Betrieb 2 die Auswirkungen der Optimierung auf Kulturartenvielfalt, Humusbilanz, erzeugte Mengen und Kalorien und den Gesamtdeckungsbeitrag auf den Ackerflächen. In den neu vorgeschlagenen Fruchtfolgen ist die Artenzahl auf Betriebsebene von 4 auf 7 und innerhalb der Fruchtfolge von 2 auf 3 bzw. 4 Kulturarten angestiegen. Der Humusgehalt, der in den alten Fruchtfolgen zum C-Abbau im Boden führte, weist jetzt bilanziell eine deutliche C-Akkumulation in beiden neuen Fruchtfolgen auf. Die erzeugten Biomassemengen auf den Ackerflächen sind gestiegen (+ 16 %), während die erzeugten Nahrungsmittelmengen um den gleichen Prozentsatz zurückgegangen sind. Die auf der Betriebsfläche erzeugten Nahrungsmittelkalorien (in kcal) sind jedoch nahezu gleichgeblieben, während durch die höheren Biomasseerträge der Heizwert (hier ausgedrückt in kcal) der erzeugten Biomasse angestiegen ist. Der Gesamtdeckungsbeitrag ist durch die Umstellung der Fruchtfolgen um ca. 5 % abgesunken. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass mit Winterweizen und Zuckerrüben zwei deckungsbeitragsstarke Kulturen im Anbauumfang deutlich reduziert wurden. Die Optimierung der Fruchtfolgen in Tabelle 3-9 wurde auf der Grundlage der klassischen Ackerbaulehre und als Ergebnis aus Gesprächen mit den Landwirten durchgeführt (s. auch Karpenstein-Machan et al. 2013).

Mit Hilfe eines linearen Programmierungmodells (LP) wurde ebenfalls eine Optimierung der Fruchtfolgen vorgenommen. Dadurch kann eine Zielfunktion unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen maximiert oder minimiert werden. So kann beispielsweise der Gesamtdeckungsbeitrag eines landwirtschaftlichen Betriebes maximiert werden, wobei ackerbauliche und betriebliche Vorgaben (nachfolgend „Restriktionen“ genannt) und fixe Produktionsfaktoren (z.B. Fläche, Arbeit) Berücksichtigung finden. Als Ergebnis der LP werden mögliche Kulturarten in ihren Anbauumfängen sowie in ihren Vorfrucht-Nachfruchtkombinationen ausgegeben. Fruchtfolgen kann man aus der LP nicht direkt ableiten, da es sich nur um ein einjähriges Modell handelt und die für die Vorfrucht-Nachfruchtkombinationen vorgesehenen Flächenumfänge oft sehr stark gesplittet werden. Neben dem Status quo wurden 3 Optimierungsstufen geprüft, in denen die jeweiligen Restriktionen der ökonomischen, pflanzenbaulichen und naturschutzfachliche Optimierung angewendet wurden (s. Tabelle 3-9, s. Karpenstein-Machan et al. 2013).

Tabelle 3-9: Auswirkungen der Optimierung der Fruchtfolgen des Betriebes 2 auf Anbaufläche der Kulturarten, Kulturartenvielfalt, Humusbilanz, erzeugte Erntemengen/Kalorien und Gesamtdeckungsbeitrag

Betrieb 2			
Alte Fruchtfolgen		**Neue Fruchtfolgen**	
1) Mais/Mais/Sommerweizen		1) W.Triticale-GPS-Ackergras/Mais/S.Weizen	
2) W.Weizen/W.Weizen/W.Weizen/Zuckerrüben		2) S.Hafer/W.Weizen/W.Weizen/Zuckerrüben	
		3) Silphie	
Anbaufläche	**253 ha**	**Anbaufläche**	**253 ha**
W.Weizen	134 ha	W.Triticale-GPS-Ackergras	13,3 ha
Zuckerrüben	71 ha	Mais	13,3 ha
Mais	25 ha	S.Weizen	13,3 ha
S.Weizen	15 ha	S.Hafer	50 ha
W.Roggen	8 ha	W.Weizen	100 ha
		Zuckerrüben	50 ha
		Silphie	13 ha
Kulturen auf Betriebsebene	4		7
Kulturen in der Fruchtfolge	2		3 and 4
Humus/Akkumulation/Degradation in kg C/ha/a			
Alte Fruchtfolgen		**Neue Fruchtfolgen**	
Fruchtfolge 1	-242	Fruchtfolge 1	268
Fruchtfolge 2	-60	Fruchtfolge 2	224
Erzeugte Erntemengen/Kalorien		**Erzeugte Erntemengen/Kalorien**	
erzeugte Biomassemenge in dt	14.884		17.325
erzeugte Nahrungsmittelmenge in dt	57.837		48.405
erzeugte Biomasse in kcal	6.039.510.474		7.328.910.144
erzeugte Nahrungsmittel in kcal	6.054.579.685		6.004.037.208
Gesamtdeckungsbeitrag in Euro			
	vor der Umstellung	**nach der Umstellung**	
W.Weizen	92.996	81.800	
Zuckerrüben	91.093	75.500	
S.Hafer	0	18.350	
Mais	15.050	8.738	
S.Weizen	13.515	12.196	
W.Triticale-GPS-Ackergras	0	5.493	
W.Roggen	4.032	0	
Silphie	0	3.296	
Summe	**216.686**	**205.373**	

Tabelle 3-10 zeigt die Ergebnisse des linearen Programmierungsmodells. Die ökonomische Optimierung liegt 6 % über dem Status quo des Betriebsergebnisses. Durch die pflanzenbauliche Optimierung sinkt der Gesamtdeckungsbeitrag um 7 %. Greifen weitere Restriktionen im Rahmen der naturschutzfachlichen Opti-

mierung, wird der Gesamtdeckungsbeitrag im Vergleich zur ökonomischen Optimierung um 9 % reduziert.

Pflanzenbaulich optimierte Lösungen kommen dem Betrieb zugute und können insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels mittelfristig auch „rein" ökonomischen Lösungen überlegen sein, da die „Selbstregulierungskräfte" durch diversifizierte Fruchtfolgen gestärkt und extreme Klimasituationen durch eine Vielfalt unterschiedlicher Arten besser überwunden werden können (v. Buttlar et al. 2011). Für darüberhinausgehende Naturschutzmaßnahmen, wie z.B. für Blühstreifen sollte ein finanzieller Anreiz geschaffen werden, damit positive Effekte zur Erhöhung der faunistischen und floristischen Artenvielfalt, die dem landwirtschaftlichen Betrieb nur indirekt zugutekommen, nicht zu Lasten des ökonomischen Betriebsergebnisses erfolgen.

Tabelle 3-10: Ergebnisse der Optimierung der Anbauumfänge des Betriebes 2 mithilfe eines Linearen Programmierungsmodells (LP)

Optimierungs-stufen	**Gesamtdeckungs-beiträge in €**	**in %**	**Annahmen, Restriktionen**
Status Quo des Betriebes	274 438	100	Grundlage Anbaujahre 2010/2011
Ökonomische Optimierung	291 864	106	CC- Regularien gelten, weitere Anbauumfänge nicht eingeschränkt
Pflanzenbauliche Optimierung	289 145	99	CC- Regularien gelten, zusätzlich max. 50 % Winter-weizenanbau, max. 25 % Kreuzblütler, minimal 30 % Sommerungen, 5 % Blühstreifen im Mais
Naturschutz-fachliche Optimierung	282 974	97	CC- Regularien gelten, max. 50 % Winterweizenanbau, max. 25 % Kreuzblütler, minimal 30 % Sommerungen (kein Mais), 6 % Blühstreifen in allen Kulturen

3.3.3.5 Aktionsforschung

Im Rahmen der Aktionsforschung wurden 14 Veranstaltungen (3 Feldführungen, 9 Workshops und 3 Exkursionen zu interessanten ‚Erneuerbaren Energie (EE) Kommunen' durchgeführt. Zu allen Veranstaltungen wurden diverse Akteure aus den betreuten Regionen eingeladen (Bürgermeister, Landkreisvertreter, EE-Akteure, Landwirte, landwirtschaftliche Berater, Anlagenbetreiber, Naturschutzverbände, Landvolk, Landwirtschaftskammer). Ziel der Aktionsforschung war es, die auf verschiedenen Ebenen der Region vorhandenen Akteure der Bioenergie zusammenzuführen und sowohl nachhaltige Anbaukonzepte des Energiepflanzen-

baus zu befördern, als auch nachhaltige, partizipartive Bürgerprojekte auf den Weg zu bringen. Als ein Beispiel des erfolgreichen Agierens ist die Ausschreibung eines Bioenergiedorfwettbewerbs durch die Landkreisverwaltung im LK Wolfenbüttel zu nennen. Zwei Dörfer im LK Wolfenbüttel werden auf dem Weg zu ‚Erneuerbaren-Energien-Kommunen' begleitet. Diese neu erarbeiteten Dorfkonzepte gehen über die Nutzung von Bioenergie hinaus und beziehen auch andere erneuerbare Energien (wie Solar- und Windenergie) mit ein.

3.3.4 Schlussfolgerungen für die Praxis

Viele landwirtschaftliche Betriebe weisen heute sehr enge Fruchtfolgen auf, und die Anzahl der kultivierten Kulturen auf Betriebsebene ist sehr gering. Diese eingeschränkte Kulturartenzahl sowohl in Marktfrucht- als auch in Biogasbetrieben (s. auch Karpenstein-Machan & Weber, 2010), ist die Hauptursache für die abnehmende biologische Vielfalt in der Landschaft und verursacht auf der Betriebsebene einen hohen Aufwand an Pflanzenschutz- und Düngemitteln, um das bisherige Ertragsniveau zu halten. Einseitige Fruchtfolgen und Monokulturen führen zu Ackerbau- und Umweltproblemen wie Fruchtfolgeerkrankungen, Bodenerosion, Bodenverdichtungen und Humusdegradation und hohem Energieeinsatz in der Landwirtschaft.

Eine Auflockerung der Fruchtfolgen und die Integration neuer, bisher nicht angebauter Kulturarten sowie die Herausnahme von ökologisch sensiblen Standorten aus der Fruchtfolge für den extensiven Anbau von Dauerkulturen sind die Grundlagen für einen „integrativen Energiepflanzenanbau" (IEPB). Auf problematischen Standorten eröffnet er große Chancen, die negativen ökologischen Effekte einer intensiven Landwirtschaft auf die Biodiversität und die Landschaftsfunktionen abzumildern. Durch gezielten Anbau von Energiepflanzen, insbesondere durch Dauerkulturen kann eine Verminderung der Bodenerosion, C-Speicherung durch Humusaufbau, Reduktion des Austrages von Stickstoff und Pflanzenschutzmitteln in Grund- und Oberflächenwasser, Erhöhung der Wasserrückhaltefähigkeit der Flächen etc. erreicht werden.

Wie in den drei Beispielfarmen gezeigt werden konnte, ist die Integration von neuen Kulturarten auf Betriebsebene und in die Fruchtfolge möglich, ohne die Betriebsabläufe zu beeinträchtigen. Die vorgestellten Kulturen sind an unsere Klimabedingungen in Mitteleuropa angepasst und darüber hinaus sowohl auf Standorten mit hoher als auch auf Standorten mit geringerer Bodengüte anbaubar. Die Umstellung auf pflanzenbaulich optimierte Fruchtfolgen führt im Ergebnis zu einer Erhöhung der Kulturartenzahl, der Humusabbau wird zugunsten einer C-Speicherung im Boden gestoppt, die Biomasseerträge auf Betriebsebene werden gesteigert, ohne dass die kalorische Nahrungsmittelproduktion beeinträchtigt ist. Die Gesamtdeckungsbeiträge (GDB) der Betriebe wird durch die pflanzenbauliche Optimierung im Vergleich zum Status Quo im Mittel um 4 % reduziert (in einem Betrieb wird der GDB erhöht und in zwei Betrieben verringert). Die mit Hilfe des

linearen Programmierungsmodells (LP) vorgenommene Optimierung der Fruchtfolgen zeigt auf, dass die Gesamtdeckungsbeiträge bei der über die ackerbauliche Optimierung hinausgehende naturschutzfachliche Optimierung lediglich nur 9 % unter der ökonomischen Optimierung liegt. Durch entsprechende Naturschutzprogramme (s. Kap. 3.5) können die finanziellen Einbußen der Betriebe gedeckt werden, wenn die Fruchtfolgen einen Beitrag zum Naturschutz leisten.

Im integrativen Energiepflanzenbau (IEPB) sollten z. B. Niedermoorböden, die unter ackerbaulicher Nutzung kontinuierlich Humus verlieren, oder auswaschungsgefährdete Karststandorte für Dauerkulturen vorgesehen werden. Hier ist insbesondere die Silphie eine interessante Alternative zum annuellen Maisanbau, da sie ein hohes Ertragspotenzial mit extensivem Anbau verbindet. In unseren Praxisversuchen lag die Durchwachsene Silphie im Biomasseertrag deutlich über der ebenfalls für den Daueranbau geigneten Wildpflanzenmischung für Biogas.

Aber auch generell können Ackerbaustandorte vom IEPB profitieren, da für den Biomasseanbau andere, als die bisher angebauten Kulturarten interessant werden, die Anbaukonzepte artenreicher gestaltet werden können und letztendlich auch vor dem Hintergrund des Klimawandels integrative Schutz- und Nutzungskonzepte zukunftsfähiger sind als herkömmliche artenarme Anbaustrategien.

Literatur

Aretz, A. & Hirschl, B. (2007). *Biomassepotenziale in Deutschland –Übersicht maßgeblicher Studienergebnisse und Gegenüberstellung der Methoden.* Dendrom-Diskussionspapier Nr. 1. Studie im Rahmen des Verbundprojektes DENDROM – Zukunftsrohstoff Dendromasse. 15. S. Gesichtet am 27.6.2017: http://www.nachhaltige-waldwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Infos_Verbuende/Diskussionspapier_Potenzialanalyse_IOEW.pdf

Börjesson, P. (1999). Environmental effects of energy crop cultivation in Sweden I: Identification and quantification. *Biomass and Bioenergy 16*, 137-154.

Conrad, M, Biertümpfel, A. (2010). *Optimierung des Anbauverfahrens für Durchwachsende Silphie (Silphium perfoliatum L.) als Kofermentpflanze in Biogasanlagen sowie Überführung in die landwirtschafliche Praxis.* Abschlussbericht. Gesichtet am 18.11.2013: http://www.tll.de/ainfo/pdf/silp0111.pdf

Conrad, M., Biertümpfel, A. & Vetter, A. (2009). Durchwachsene Silphie (Silphium perfoliatum L.) – von der Futterpflanze zum Koferment. in Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR. Hrsg.): 2. Symposium Energiepflanzen 2009, *Gülzower Fachgespräche* 34, 281-289.

Don, A., Osborne, B., Hastings, A., Skiba, U., Carter, M. S., Drewer, J., Flessa, H., Freibauer, A., Hyvönen, N., Jones, M. B., Lanigan, G. J., Mander, Ü., Monti, A., Djomo, S. N., Valentine, J., Walter, K., Zegadalizarau, W. & Zenone, T.

(2012). Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *GCB Bioenergy* 4, 372–391.

Elder, J.W. & Lal, R., (2008). Tillage effects on gaseous emissions from an intensively farmed organic soil in North Central Ohio. *Soil and Tillage Research* 98(1), 45-55.

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016). *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2016*. 52 S. Gesichtet am 31.11.2016: http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_20162.pdf

Hannah, l., Carr, J. L. & Lankerani, A. (1994). Human disturbance and natural habitat: level analysis of a global data set. *Biodiversity and Conservation 4*, 128-155.

Jungkunst, H.F., Freibauer, A., Neufeldt, H. & Bareth, G. (2006). Nitrous oxide emissions from agricultural land use in Germany – a synthesis of available annual field data. *Journal of plant nutrition and soil science 169*(3), 341–351.

Karpenstein-Machan, M. (1997). *Konzepte für den Energiepflanzenbau*. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt, ISBN -3-7690-0546-5.

Karpenstein-Machan, M. (2001). Sustainable cultivation concepts for domestic energy production from biomass. *Critical Reviews of Plant Science, Special Issue on Bioenergy 20; New York*, 1–14.

Karpenstein-Machan, M. (2002). Low input energy crop rotations without herbicides. *Pflanzenbauwissenschaften 6* (1), 36 – 46.

Karpenstein-Machan, M. (2004). Neue Perspektiven für den Naturschutz durch einen ökologisch ausgerichteten Energiepflanzenbau. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 2/36, 58 -64.

Karpenstein-Machan, M. (2005). *Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber*, DLG - Verlags-GmbH, Frankfurt, ISBN 3-7690-0651-8.

Karpenstein-Machan, M. (2009). Bioenergie und Naturschutz im Kontext Nachhaltiger Entwicklung: Energiepflanzenbau nach ökologischen Leitlinien. In Europarc Deutschland e.V. (Hrsg.), *Bioenergie - Fluch oder Segen für nationale Naturlandschaften?* S. 26-31.

Karpenstein-Machan, M. (2011). Implementation of integrative energy crop cultivation concepts on biogas farms. International Nordic Bioenergy 2011. In: Savolainen, M. (Hrsg.), *Book of Proceedings, Finbio publication 51*, S. 127-133; ISBN 978-952-5135-51-0.

Karpenstein-Machan, M. (2012). Es geht auch mit anderen Kulturen. *Land und Forst* 13, 32 – 34.

Karpenstein-Machan, M. (2013). Integrativer Energiepflanzenbau als Baustein der regionalen Energiewende. *Ländlicher Raum Agarsoziale Gesellschaft* 3, 26-28.

Karpenstein-Machan, M. & Finckh, M. R. (2002). Crop diversity for pest management. In Pimentel, D. (Hrsg.): *Dekker Encyclopedia of Pest Management*. S. 162-165 Dekker: New York.

Karpenstein-Machan, M. & Weber (2010). Energiepflanzenanbau für Biogas-anlagen: Veränderung der Fruchtfolgen und der Bewirtschaftung von Acker-flächen in Niedersachsen. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 42(10), 313–320.

Karpenstein-Machan, M., Zimmermann, T. & Musshoff, O. (2013). Ökonomische und pflanzenbauliche Optimierung des Anbaus von Nahrungs-, Futter- und Energiepflanzen mit Unterstützung eines linearen Programmierungsmodells. *Berichte über Landwirtschaft* 91 (1), 1 -16.

Meissle, M., Mouron, P., Musa, T., Bigler, F., Pons, X., Vasileiadis, V. P., Otto, S., Antichi, D., Kiss, J., Palinkas, Z., Dorner, Z., van der Weide, R., Groten, J., Czembor, E., Adamczyk, J., Thibord, J.-B., Melander, B., Cordsen Nielsen, G., Poulsen, R. T., Zimmermann, O., Verschwele, A. & Oldenburg, E. (2010). Pests, pesticide use and alternative options in European maize production: current status and future prospects. *J. Appl. Entomol.* 134, 357-375.

Murphy, S. D., Clements, D. R., Belaoussoff, S., Kevan, P. G. & Swanton, C. J. (2006). Promotion of weed species diversity and reduction of weed seedbanks with conservation tillage and crop rotation. *Weed Science* 54, 69–77.

Power, A. G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Phil. Trans. R. Soc.* 365, 2959-2971.

Rode, M. & Kanning, H. (Eds.) (2010). *Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade*. Ibidem-Verlag, Stuttgart.

Stülpnagel, R., v. Buttlar, C., Heuser, F., Wagner, D. & Wachendorf, M. (2007). Standortvergleiche zum Zweikultur-Nutzungssystem. *Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe* 31, 78–96.

VdLUFA (2004). Humusbilanzierung – Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Standpunktpapier*. VDLUFA Selbstverlag.

Vollrath, B., Kuhn, W., Werner, A. & Degenberg ,M. (April 2011). Was können Wildpflanzen als Biogassubstrat leisten? Präsentiert auf der „*Fachtagung Energie aus Wildpflanzen*", Berlin 12. 4. 2011.

Wegener, J. W., Lücke, W. & Heinzelmann, J. (2006). Analyse und Bewertung landwirtschaftlicher Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. *Agrartechnische Forschung* 12, 103-114.

3.4 Biomassepotenzialbestimmung mit BioSTAR

Roland Bauböck, Martin Kappas

3.4.1 Problembeschreibung

3.4.1.1 Erfassung und Berechnung von Biomassepotenzialen im Agrarbereich

Biomassepotenziale beinhalten die Höhe der in einem Gebiet oder einer Region potenziell zur Verfügung stehenden und erntebaren Biomasse. Sie sind oftmals nur ungenügend bekannt, um als verlässliche Größe für die Planung von Bioenergieanlagen zu dienen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn in einem Gebiet oder einer Region noch wenig Erfahrung mit dem Energiepflanzenanbau vorliegt und/oder neue Kulturarten und Fruchtfolgen eingesetzt werden sollen. Auch aus den Anbaustatistiken der besonderen Ernteerhebungen des statistischen Landesamtes lassen sich diese Informationen nicht entnehmen. Grund ist, dass die Erhebungen auf Kreisebene aggregiert sind und die Situation für Gemeinden nur über sog. Ertragsmesszahlen angepasst werden muss.

Der im folgenden Teil dieses Kapitels beschriebene Weg der Biomassepotenzialbestimmung ist modellbasiert. Sie ermöglicht eine klima- und bodenabhängige Berechnung eben dieser Potenziale auf beliebigen Skalenebenen. Je nach Verfügbarkeit von Eingangsdaten (Boden und Klima) können mit dem modellbasierten Ansatz schlaggenaue oder auch großflächig aggregierte Ertragsdaten für diverse Agrarkulturen und Fruchtfolgen simuliert werden.

Die modellbasierte Berechnung von Erträgen im Agrarbereich hat ihre Anfänge in den 1960er Jahren (Bouman et al. 1996) und ist seit dieser Zeit fortlaufend weiterentwickelt worden. Für die Modellierung von Agrarkulturen existieren heutzutage diverse Modelle, deren Einsatz- und Anwendungsbereiche sowie deren Funktionalitäten teilweise sehr unterschiedlich sind. So ist es durchaus sinnvoll, für einen vom Modellierer gewünschten, aber von vorhandenen Modellen nicht oder nur teilweise abgedeckten Anwendungsbereich ein eigenes Modell zu entwickeln.

Die Entwicklung von BioSTAR (**Bio**mass **S**imulation **T**ool for **A**gricultural **R**esources) ist aus dem Bedarf heraus entstanden, ein Biomassesimulationsmodell für typische, in Niedersachsen angebaute Agrarkulturen zur Verfügung zu stellen. Eine Anforderung an das Modell bestand darin, dass sich klein- und großräumige Biomassepotenziale aus Bodeninformationen der Bodenschätzungskarten und der Bodenübersichtskarte (Maßstäbe 1:5000 und 1:50.000) und Klimadaten der Deutschen Wetterdienst (DWD)-Messstationen unkompliziert in das Modell bzw. in dessen Software eingepflegt werden können (Bauböck 2013a,b). Weiterhin sollte das Modell robuste Gesamtbiomassepotenziale berechnen, also nicht in erster Linie auf den Fruchtertrag ausgelegt sein. Komplexere Pflanzenmodelle (wie z.B.

das DSSAT oder APSIM) sind daraufhin ausgelegt, Anbausysteme auf einzelnen landwirtschaftlichen Betrieben oder Produktionseinheiten zu simulieren. Hierfür werden teilweise sehr differenzierte Kenntnisse über Düngergaben, Bodenstickstoff- und Kohlenstoffwerte, pH-Wert, Aluminiumsättigung und Bewirtschaftung benötigt. Da für großflächige Biomassepotenzialbestimmungen diese Informationen nicht zur Verfügung stehen, und auch bei Hunderten oder Tausenden von Einzelflächen kaum mit einem noch zu rechtfertigenden Aufwand in ein Modell eingepflegt werden können, lag im vorliegenden Bedarfsfall die Entwicklung eines eigenen Modells nahe. BioSTAR war zunächst eine Excel-basierte Anwendung, die mit zunehmender Komplexität dann in Java programmiert wurde mit allen Vorteilen, die eine objektorientierte Programmiersprache mit sich bringt. Für die Ressourcenverwertung (im Fall von BioSTAR die einfallende fotosynthetisch aktive Strahlung) wurde zunächst ein CO_2-basierter Wachstumsmotor (Azam-Ali et al. 1994) und eine modelleigene Verdunstungsberechnungsmethode für das Modell gewählt. In der jüngsten Entwicklungsphase wurden dem Modell noch zwei Wasserproduktivitäts-Wachstumsmotoren und ein strahlungsbasierter Wachstumsmotor hinzugefügt. Weiterhin kann für die Berechnung der Verdunstungshöhen auf drei weitere Ansätze (Penman-Monteith, Turc und Blaney-Criddle) zurückgegriffen werden. Die Software des Modells ist so ausgelegt, dass alle Inputdaten für eine Simulation in Microsoft Access-Tabellen hinterlegt sind und für die Ergebnisse der Simulation neue Tabellen in selbiger Datenbank angelegt werden. Diese Softwarearchitektur ermöglicht eine gute Organisation und eine schnelle Bearbeitung der Daten. Auch große, aus vielen tausenden Einzeldatensätzen bestehende Boden- und Klimadateien lassen sich mit wenig Aufwand in die Software einbinden und verarbeiten. Alle Parameter und Eigenschaften für die verschiedenen Kulturen und Bodenarten sind in jeweils einer eigenen Tabelle hinterlegt und lassen sich daher schnell vergleichen und ggf. bearbeiten. Insgesamt betrachtet bieten der Aufbau des Modells BioSTAR und dessen Software ein schnelles und einfach zu handhabendes Biomassesimulationswerkzeug, welches allerdings im Gegenzug auf einige hochaufgelöste Prozesse im Bereich von Bewirtschaftung und Bodenchemie verzichtet.

Die BioSTAR-Software und das Benutzerhandbuch stehen auf der Internetseite der Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung der Fakultät für Geowissenschaften und Geographie an der Universität Göttingen zur Verfügung. Das Handbuch ist in leicht abgewandelter Form ebenfalls im Anhang dieses Buches (Kap. 5.2) zu finden. Das Programm war von R. Bauböck, J. Degener, C. Revillaund M. Kappas entwickelt worden (Bauböck 2013a; Bauböck & Revilla ohne Jahr).

3.4.2 Methoden

3.4.2.1 Die Wachstumsmotoren des Modells BioSTAR

Der primäre Wachstumsmotor des BioSTAR Modells ist CO_2-basiert und berechnet über Gleichung 1 die strahlungsabhängige Brutto-CO_2-Assimilationsmenge eines Pflanzenbestandes (Boote & Loumis 1991). Die Gleichungen 2-4 stellen die drei weiteren Wachstumsmotoren des BioSTAR Modells dar. Gleichung 2 berechnet anhand des Parameters e (Gramm Trockenmasse pro MJ Strahlung) und der fotosynthetisch aktiven Strahlung (*IPAR*) die tägliche Biomasseakkumulation nach dem Ansatz von Monteith (1977). Gleichung 3 (Wasserproduktivitätsansatz) legt ein konservatives Verhältnis von Biomasseproduktion (oberirisch) zu der transpirierten Wassermenge eines Pflanzenbestandes zugrunde (WP-Faktor). Aus dem Produkt von WP und dem Verhältnis von aktueller zu potenzieller Transpiration errechnet sich der Biomassezuwachs pro m^2 und Tag (Steduto et al. 2007). In Gleichung 4 wird mit dem Transpirationsansatz nach Tanner & Sinclair (1983) das Sättigungsdefizit der Luft für Wasserdampf mit der aktuellen Verdunstung und dem Koeffizienten BT (Biomassetranspirationsverhältnis) in Beziehung gesetzt und hieraus die transpirationsabhängige Biomassebildung (oberirdisch) abgeleitet.

3.4.2.2 Die Evapotranspirationsmethoden im Modell BioSTAR

Für die Berechnung der Evapotranspiration stellt BioSTAR vier Methoden zur Verfügung. Die modelleigene Methode berechnet die tägliche Transpirationsmenge als Verhältniswert von Wasserabgabe zu CO_2-Aufnahme durch die Blätter des Bestandes. Hierbei spielen die jeweiligen Konzentrationen der beiden Gase (CO_2 und Wasserdampf) in der umgebenden Atmosphäre eine Rolle. Bei steigender Sättigungs der Luft reduziert sich das Dampfgefälle vom Blatt zur Atmosphäre und die potenzielle Transpiration sinkt (Gleichung 5). Ähnlich verhält es sich beim CO_2. Hier führt ein steigender Gehalt in der Atmosphäre zu einer höheren potenziellen Fixierung des Gases (C_3-Pflanzen) und zu einem günstigeren Transpirationskoefizienten (C_4- und C_3-Pflanzen) (Gleichung 6). Aus dem Verhältnis der beiden Gradienten und der Differenz der Molekülgrößen der beiden Gase ergibt sich dann der Wasser-CO_2-Verhältniswert (Gleichung 7).

Für die Berechnung der Bodenevaporation wird beim CO_2-basierten Transpirationsansatz auf eine rein strahlungsbasierte Berechnung nach Turc zurückgegriffen (Gleichung 10). Alternativ zu der BioSTAR Verdunstungsmethode kann die potenzielle Evapotranspirationshöhe durch drei weitere Gleichungen berechnet werden. Methode zwei (Gleichung 9) ist der, vermutlich am häufigsten verwendete Ansatz, nach Penman-Monteith (Allen et al. 1998). Methode drei ist die bereits erwähnte strahlungsbasierte Gleichung nach Turc (Gleichung 10) und Methode vier eine Gleichung nach Blaney-Criddle (Gleichung 8).

3.4.2.3 Blattflächenbildung, Senszenz und Abreife

Ein Modellparameter, der insbesondere für die Fotosynthesekapazität, und somit für die Assimilationsleistung eines Bestandes zum Tragen kommt, ist der Wert des Blattflächenindex (BFI). Der BFI steigt bei laubwerfenden Pflanzen im Frühjahr bis zum Sommer an, erreicht dann einen Maximalwert und nimmt zum Herbst hin wieder ab (Jonckheere et al. 2004). Grafisch beschrieben nimmt eine (optimale) BFI-Kurve in etwa die Form einer Gauß'schen Glockenkurve an (Birch et al. 1998) (Elings 2000), kann aber auch erheblich von dieser Form abweichen.

$$Pg = P_{max} * 1 - exp^{\left(\frac{-Qe*PPFDI}{Pmax}\right)} \quad \text{[Gleichung 1]}$$

$$BIPAR = e * BIPAR \quad \text{[Gleichung 2]}$$

$$\mathrm{B} = \mathrm{WP} * \sum \frac{\mathrm{Tr_i}}{\mathrm{ET0i}} \quad \text{[Gleichung 3]}$$

$$\mathrm{Gw} = \frac{\mathrm{T_{act}} * \mathrm{BT}}{\mathrm{VPD}} \quad \text{[Gleichung 4]}$$

Wobei:

P_g : Brutto Fotosytheserate in mmol $CO_2 * m^{-2} * s^{-1}$
Qe : Lichtquanteneffizienz in mmol $CO_2 * mol^{-1}$ Lichtquantum
$PPFDI$: fotosynthetisch aktive Strahlung (IPAR) in mmol $* m^{-2} * s^{-1}$
P_{max} : Maximale Fotosyntheserate in mmol $CO_2 * m^{-2} * s^{-1}$
BIPAR: IPAR-abhängige oberirdische Biomasseproduktion in $g * m^{-2} * Tag^{-1}$
IPAR : Aufgefangene fotosynthetisch aktive Strahlung
e : Strahlungsnutzungseffizienz in g * MJ
B : Oberirdische Biomasseproduktion in $g * m^{-2} * Tag^{-1}$
WP : Wasserproduktivitätsfaktor in g Biomasse * kg^{-1} Wasser * m^{-2}
Tr_i : Transpiration in mm * Tag^{-1}
ET_{0i} : Vergleichs-Evapotranspirationshöhe * Tag^{-1}
Gw : wasser- begrenztes Wachstum
T_{act} : Aktuelle Transpiration in mm * Tag^{-1}
BT : Biomasse/Wasser Transpirationsverhältnis in g Biomasse * Pa * g^{-1} Wasser
VPD : Sättigungsdefizit (H_2O) der Luft in Pa

Der Blattflächenindexwert erreicht bei 5 einen für die Lichtinterzeption nahezu optimalen Wert (Gardener et al. 1985). BFI-Werte können im Falle von Wäldern aber auch für Kulturpflanzen durchaus über 5 liegen.

Anhand des BFI-Wertes können außerdem Rückschlüsse gezogen werden auf die Bestandesdichte von Ackerkulturen (Wang 2001), die Wasserversorgung (Steduto et al. 1998; Mailhol et al. 1997; Krieg 1983; Han 2008) und die Nährstoffversorgung eines Bestandes (Gillet et al. 1999; Richter et al. 2001; Albrizio & Steduto 2005).

$$H_2O_{grad} = (VP_{def} * Vol_{mol}) / 18) * 1000 \qquad \text{[Gleichung 5]}$$

Wobei:

H_2O_{grad} : H_2O-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre in millimol pro mol
VP_{def} : Sättigungsdefizit der Luft in Gramm pro Kubikmeter
Vol_{mol} : Volumen von 1 mol trockener Luft
Faktoren 18 bzw. 1000 : Umrechnungen von Gramm auf mol H_2O bzw. mol in mmol

$$CO_{2grad} = (CO_{2con} – (CO_{2con} * C_i/C_a)) / 1000 \qquad \text{[Gleichung 6]}$$

Wobei:

CO_{2grad} : CO_2-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre in mmol pro mol
CO_{2con} : CO_2-Konzentration der Atmosphäre in ppm bzw. $\mu mol * mol^{-1}$
C_i/C_a : Verhältnis von internem zu externem CO_2-Gehalt (dimensionslos)
Faktor 1000 : Umrechnung von µmol in mmol

$$Wat_{use}= (H_2O_{grad} / CO_{2grad}) * 1,56 \qquad \text{[Gleichung 7]}$$

Wobei:

Wat_{use} : Wasser / CO_2-Verhältniswert
H_2O_{grad} : H_2O-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre in mmol pro mol
CO_{2grad} : CO_2-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre in mmol pro mol
Faktor 1,56 : Verhältnis von Molekülgröße von Wasserdampf zu CO_2

Da die Entwicklung des Blattflächenindex bei guter Nährstoff- und Wasserversorgung als direkte Funktion der zur Verfügung stehenden Temperatursumme betrachtet werden kann, lassen sich BFI-Kurven in einem Pflanzenmodell sehr gut über den Parameter der Umgebungstemperatur (als Tagesmittelwert) modellieren. Diese Art der BFI-Modellierung ist bereits in vielen Modellen erprobt und durch Feldmessungen validiert worden (Vleeshouwers 1998; Clifton-Brown et al. 2000;

van der Werf et al. 1993; Soltani & Galeshi 2002; Chapman et al. 1993; Lafarge & Hammer 2002; Lambert et al. 1999).

$$ET_0 = \left(\frac{Lday}{4380*100} * 0{,}457 * T_{cel}\right) + 8{,}128$$ [Gleichung 8]

Wobei:

ET_0 : Bezugs-Evapotranspirationsmenge in mm pro Tag
T_{cel} : Temperatur in 2 m Höhe in Grad Celsius
Lday: Tageslänge in Stunden

$$ET_0 = \frac{0{,}408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T_{cel}+273} * U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0{,}34 * U_2)} * K_c$$

[Gleichung9]

Wobei:

ET_0 : Bezugs-Evapotranspirationsmenge in mm pro Tag
Δ : Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve in kPa pro Grad Celsius
λ : Psychrometerkonstante in kPa pro Grad Celsius
R_n : Netto-Strahlung in MJ pro m² pro Tag
G : Bodenwärmestrom in MJ pro m² pro Tag
T_{cel} : Temperatur in 2 m Höhe in Grad Celsius
U_2 : Windgeschwindigkeit in m/s in 2 m Höhe
$e_s - e_a$: Sättigungsdefizit der Luft (Wasserdampf) in kPa
K_c : Phänologie- und Kultur-spezifischer Multiplikator

$$ET_0 = 0{,}0031 * \left(\frac{T_{cel}}{T_{cel}+15} * (RJ * 0{,}85) + 209\right) * 1{,}1$$ [Gleichung 10]

Wobei:

ET_0 : Bezugs-Evapotranspirationsmenge in mm pro Tag
T_{cel} : Temperatur in 2 m Höhe in Grad Celsius
RJ : Netto-Strahlung in Joule pro cm² pro Tag
Faktor 1,1 : Anpassungsfaktor für mitteleuropäischen Klimaraum
Faktor 0,85 : Albedo-Korrekturfaktor

Im Modell BioSTAR kommt also eine temperaturbasierte BFI-Modellierung zum Tragen, welche direkt an die Entwicklungskurve des Bestandes gekoppelt ist ().

Da die Entwicklungskurven der Blattfläche je nach Kultur unterschiedliche Temperatursummen erfordern, wird im Modell BioSTAR auf kulturangepasste Entwicklungskurven zurückgegriffen.

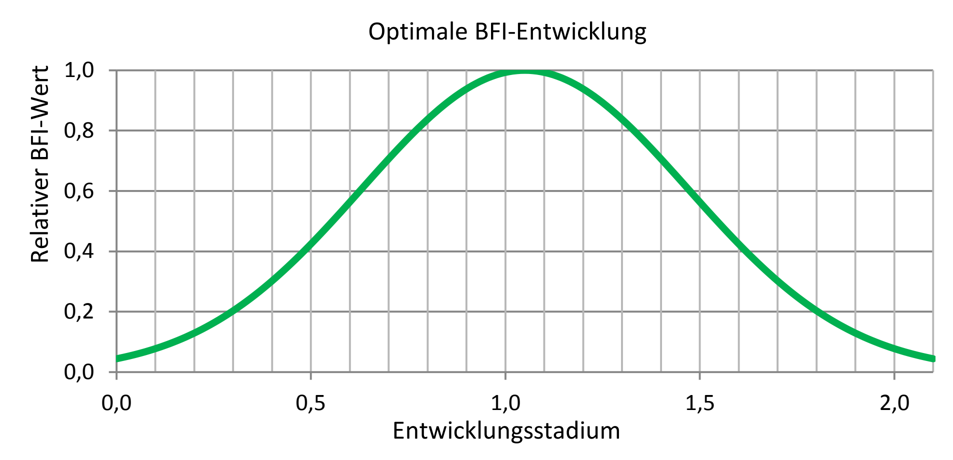


Abbildung 3-15: Polynomische Kurvenanpassung (Gauss-Normalverteilung) für den BFI-Verlauf. Quelle: Bauböck (2013a)

Diese Entwicklungskurven, bzw. die Entwicklungsgeschwindigkeiten können bei der Modellkalibrierung in der Datenbanktabelle vom Benutzer angepasst werden. Hierbei wird die phänologische Entwicklung in Stadien (orientiert an der BBCH-Skala) unterteilt. Mittels dieser Skala kann dann z.B. im Modellablauf festgelegt werden, dass der maximale BFI-Werte vor dem Zeitpunkt der Blüte erreicht wird, und dass hiernach mit dem Eintritt der Pflanzen in die generative Phase (nach der Blüte) die Seneszenz, also das Absterben der grünen Blattmasse, beginnt.

Für die Modellierung des BFI wurde im Modell eine Normalverteilungskurve mit dem Maximum kurz vor der Blüte (Stadium 1,3) gewählt (Bauböck 2013a).

3.4.2.4 Das Bodenmodell

Im Bodenmodell von BioSTAR lassen sich bis zu 16 Bodenschichten in Dezimeterintervallen definieren. Für jede Bodenschicht wird in der Datenbank eine Bodenart per Kürzel (drei Stellen, alphanumerisch) definiert. Im Programmcode sind derzeit alle Kennwerte der Bodenarten der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe-Boden, 2005) sowie die der Bodenarten der FAO-Klassifikation (Batjes et al. 2008) hinterlegt (s. Kap. 5.2).

Über die Kennwerte Feldkapazität und Welkepunkt wird ein Anfangswassergehalt für jede Schicht errechnet, dem dann im Verlauf der Simulation Wasser entzogen oder hinzugefügt wird. Entzug findet entweder durch die Wurzeln, Evaporation oder durch Einsickerung in die nächst tiefer gelegene Bodenschicht statt.

Wassereintrag erhält die erste Bodenschicht durch Niederschlagswasser und die Schichten zwei bis 16 durch Sickerwasser von der jeweils oberhalb gelegenen Schicht.

Sickern setzt im Modell dann ein, wenn eine Bodenschicht über ihre Feldkapazität hinaus mit Wasser angefüllt wird. Ein Rückstau von Wasser von unten nach

oben findet dann statt, wenn oberflächennahes Grundwasser oder eine wasserstauende Schicht im Profil vorliegt. Liegt oberflächennahes Grundwasser vor, dann wird kapillarer Aufstieg von Wasser in das Bodenprofil berechnet.

Die Menge des schichtbezogenen Wasserentzugs durch das Wurzelwerk der Pflanzen wird primär über ein separates Wurzelmodul und die entsprechende Wurzellängendichte der jeweiligen Schicht bestimmt (Bauböck, 2013a). Aus der für die Pflanzen und der für die Bodenverdunstung zur Verfügung stehenden extrahierbare Gesamtwassermenge (Bilanzierungsmethode) wird im Summierungsverfahren dann die aktuelle Evapotranspiration (ET_a) berechnet. Die Berechnung der Saugspannungskurven in Abhängigkeit von den Bodenwassergehalten erfolgt über die in der Datentabelle für die Bodenarten hinterlegten van Genuchten Parameter.

3.4.2.5 Statistik

Für eine Interpretation der Modellergebnisse (Validierung) wurden der RMSE-Wert (Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung; Gleichung 12) und der von Willmott (1982) vorgeschlagene „Willmott Index of Agreement (d)“ herangezogen (Gleichung 13). Dies wurde sowohl für alle sieben modellierten Kulturen einzeln, als auch für alle zusammen durchgeführt. Um festzustellen, wie gut das Modell die inter-annuellen Klimaschwankungen bei den modellierten Ertragshöhen wiedergibt, sind die gemittelten Ertragshöhen (simuliert, beobachtet) für die einzelnen Kulturen in den Abbildungen 3-16 bis 3-19 dargestellt worden. Für alle Kulturen zusammen wurde zusätzlich eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt (Abbildung 3-20).

$$RMSE = \lfloor n^{-1} \sum_{i=1}^{n} (Pi - Oi)^2 \rfloor^{-0.5} \qquad \text{[Gleichung 12]}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} [(Pi - \bar{O}) - (Oi - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^{n} [(|Pi - \bar{O}|) - (|Oi - \bar{O}|)]^2} \qquad \text{[Gleichung 13]}$$

Wobei:

Pi : Simulierter (predicted) Wert
Oi : Beobachteter (observed) Wert
RMSE : Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung (root mean squared error)
d : Willmott index of agreement (0 = keine Übereinstimmung, 1 = völlige Übereinstimmung)

3.4.3 Ergebnisse

3.4.3.1 Validierungsergebnisse

Insgesamt betrachtet zeigen die Modellergebnisse (simulierte versus beobachtete Werte), dass das Modell BioSTAR sich für Biomasseprognosen der modellierten Agrarkulturen heranziehen lässt. Allerdings existieren innerhalb der Kulturen Unterschiede bei der Vorhersagegenauigkeit, die eine weitergehende Modellkalibrierung bzw. -verbesserung erfordern (Tabelle 3-11).

Für die Modellierung der Zuckerrübenerträge wurden die Bodenflächen in-Tonböden, Nicht-Tonböden und alle Böden untergliedert. Dies wurde so durchgeführt, da die Erträge auf den Tonböden tendenziell stark überschätzt werden. Diese Reaktion der Zuckerrübe auf Tonböden ist bekannt (Anbau auf diesen Böden wird nicht empfohlen), ist aber bisher noch nicht im Modell umgesetzt worden.

Tabelle 3-11: Mittelwerte für beobachtete und simulierte Werte, RMSE (root mean squared error), Prozentfehler (berechnet aus dem RMSE) und der WIA (Willmott index of agreement) für die untersuchten Kulturen. Quelle: Bauböck (2014)

	Mais	W-Weizen	Rübe (alle)	Rübe (Ton)	Rübe (o. Ton)
Mittelwert beob.	17,7	15,8	21,0	15,9	22,3
Mittelwert simuliert	18,2	16,1	21,8	21,1	21,9
RMSE	2,1	1,6	2,4	1,7	2,4
n	31	102	40	8	32
%-Fehler	12,1	9,8	11,5	10,4	10,9
WIA	0,94	0,86	0,77	0,94	0,85
	W-Gerste	**W-Roggen**	**S-Blume**	**Sorghum**	**Alle**
Mittelwert beob.	16,3	18,3	13,3	17.0	17,2
Mittelwert simuliert	16,1	18,7	13,4	17,3	17,7
RMSE	1.8	1,9	1,6	1,0	2,1
n	6	6	9	5	198
%-Fehler	10,8	10,3	11,9	5,6	12,1
WIA	0,64	0,73	0,56	0,78	0,92

WIA = Willmott index of agreement; 1 = völlige Übereinstimmung; 0 = keine Übereinstimmung; Mittelwert beobachtet, Mittelwert simuliert und RMSE jeweils in t Trockenmasse pro ha

Die geringsten Fehlerwerte (RMSE und Prozentfehler) treten bei der Modellierung von Sorghum (RMSE =1,0 t und 5,6 %), Winterweizen (RMSE =1,6 t und 9.8 %), W-Gerste (RMSE =1,8 t und 10,8 %), W-Roggen (RMSE =1,9 t und 10,3 %) auf. Die Simulationsergebnisse für Rübe (Ton), Rübe (kein Ton) und Rübe (alle) zeigen Fehlerwerte von 10,4 %, 10,9 % und 11,5% respektive und RMSE-Werte von 1,7 t auf

den Tonböden und 2,4 t jeweils für die anderen beiden Gruppen. Die Ergebnisse für Sonnenblume und Mais haben einen mittleren Fehler von 11,9 % und 12,1 % und RMSE-Werte von 1,6 t und 2,1 t respektive. Alle Kulturen in einer Analyse zusammengefasst weisen einen moderaten Vorhersagefehler von 12,1 % und einen RMSE-Wert von 2,1 t auf. Betrachtet man hingegen den WIA als statistisches Maß für die Vorhersagegüte des Modells, so ordnen sich die Kulturen in einer anderen Reihenfolge. Nun finden sich Mais und Rübe (Tone) mit einem WIA von 0,94 an erster Stelle, gefolgt von Winterweizen (0,86) und Rübe (ohne Tone; 0,85). Die unteren Ränge werden von Sorghum (0,78), Rübe (alle) (0,77), Winterroggen (0,73), Wintergerste (0,64) und Sonnenblume (0,56) belegt. Alle Kulturen zusammen genommen erreichen einen relativ hohen WIA von 0,92.

Die niedrigen WIA-Werte für die Wintergetreide (ohne Weizen) lassen sich damit erklären, dass die Abweichungen der einzelnen Modellvorhersagewerte in etwa gleich stark in den negativen und den positiven Bereich fallen, und daher keine ausgeprägte Tendenz zu Über- oder Unterschätzung ablesbar ist. Anders sieht es bei der Rübe auf den Tonböden aus. Hier liegen alle Simulationsergebnisse in ähnlich hohem Maße über den beobachteten Werten (Abbildung 3-17). Folglich könnte das Modell auch leichter angepasst werden. Aus den Abbildungen 3-16 bis 3-20 lässt sich gut erkennen, dass das Modell adäquat auf interannuelle Klimaschwankungen reagiert (Ausnahme hierbei Sonnenblume, Abbildung 3-20).

Die Biomassebildung von Sonnenblume wird vom Modell in drei von vier Jahren gut wiedergegeben und im Jahr 2007 stark überschätzt. Zu einem gewissen Ausmaß kann dies möglicherweise durch einen von der Landwirtschaftskammer (LWK, 2010) erwähnten Befall durch Pilze (*sclerotinia sclerotiorum*) begründet werden. Dieser Ertragsausfall ließ sich aufgrund von fehlenden Daten nicht im Modell berücksichtigen. Insbesondere das Jahr 2007 (höchster Fehlerwert, vgl. Abb. 3-19) war durch einen Sommer mit überdurchschnittlich hohen Niederschlagsmengen und somit günstigen Bedingungen für Pilzbefall gekennzeichnet.

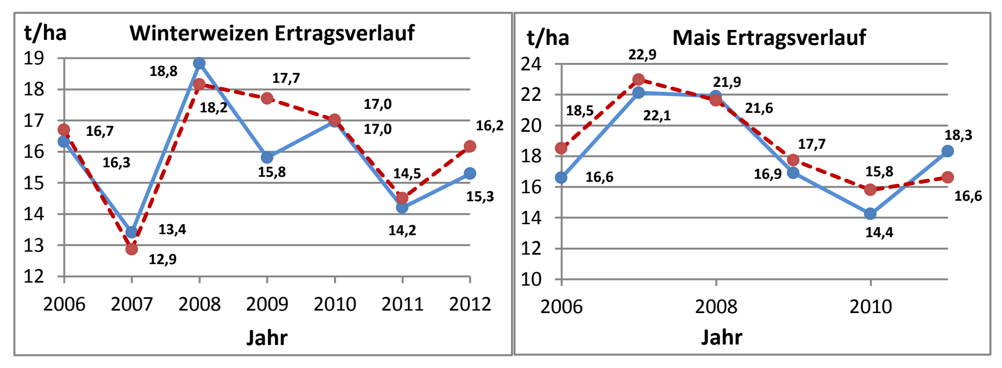


Abbildung 3-16: Interannueller Vergleich von beobachteten (durchgezogene Linie) und vorhergesagten (unterbrochene Linie) Erträgen für Winterweizen (links) und Mais (rechts). Quelle: Bauböck (2014)

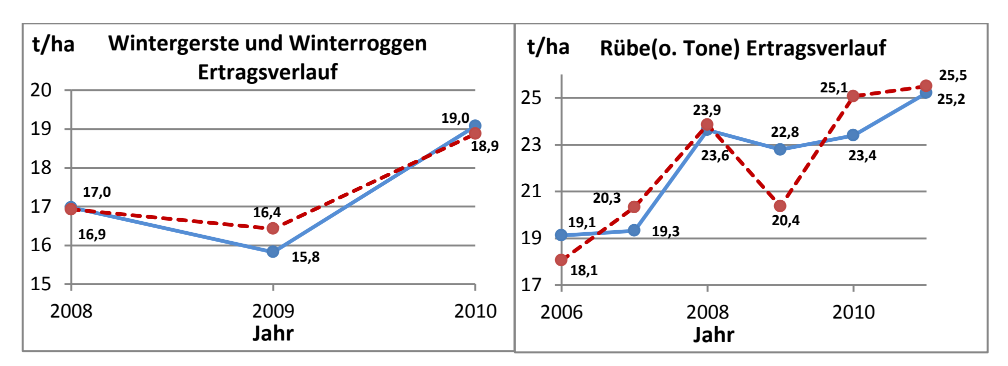


Abbildung 3-17: Interannueller Vergleich von beobachteten (durchgezogene Linie) und vorhergesagten (unterbrochene Linie) Erträgen für W-Gerste u. W-Roggen (links) und Rübe (o. Tone) (rechts). Quelle: Bauböck (2014)

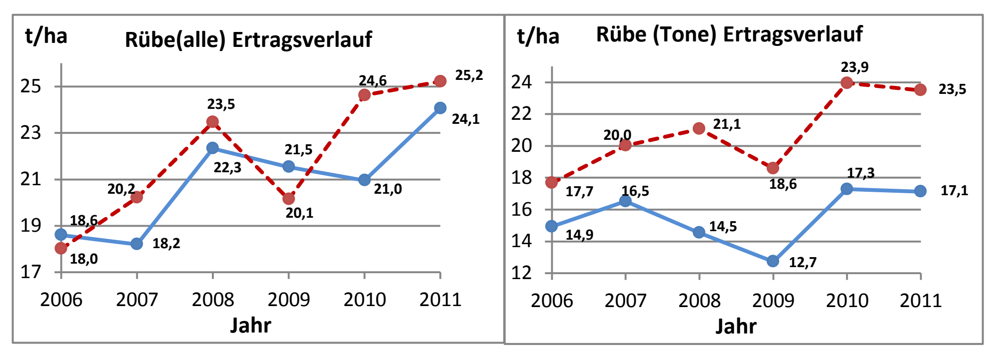


Abbildung 3-18: Interannueller Vergleich von beobachteten (durchgezogene Linie) und vorhergesagten (unterbrochene Linie) Erträgen für Rübe (alle) (links) und Rübe (Tone) (rechts). Quelle: Bauböck (2014)

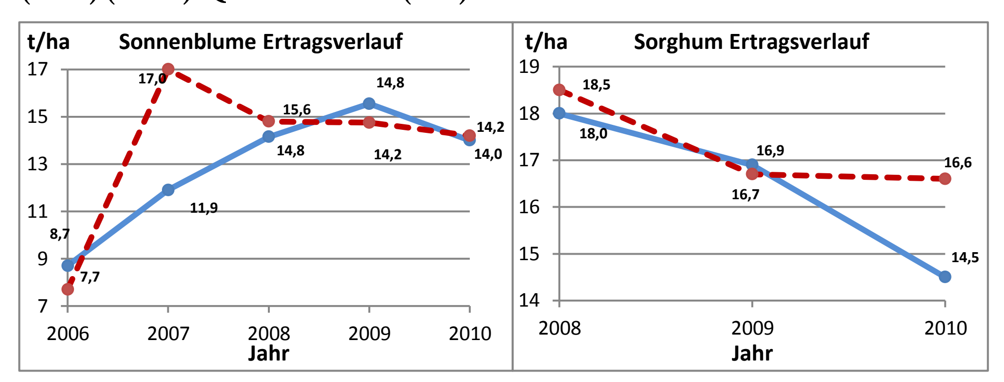


Abbildung 3-19: Interannueller Vergleich von beobachteten (durchgezogene Linie) und vorhergesagten (unterbrochene Linie) Erträgen für Sonnenblume (links) und Sorghum (rechts)

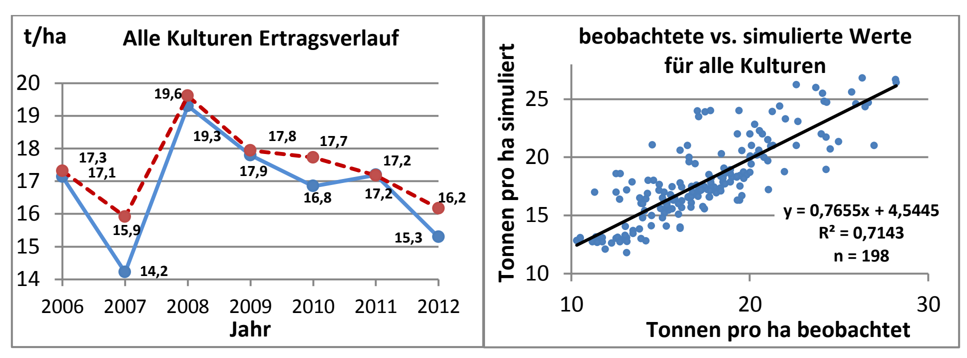


Abbildung 3-20: Interannueller Vergleich von beobachteten (durchgezogene Linie) und vorhergesagten (unterbrochene Linie) Erträgen für alle Kulturen (links) und lineare Regression von beobachteten vs. vorhergesagten Werten (rechts). Quelle: Bauböck (2014)

3.4.3.2 Eingangsdaten und Vorgehensweise für die Erstellung von Ertragsprognosen

Im folgenden Abschnitt wird nun das Modell BioSTAR verwendet, um für drei niedersächsische Landkreise (Goslar, Wolfenbüttel, Region Hannover) die potenziellen Biomasseerträge verschiedener Pflanzen auf Agrarflächen (Acker) zu berechnen. Die drei Landkreise wurden aufgrund der bestehenden Kooperation zwischen dem Forschungsprojekt, in dessen Rahmen das Modell entwickelt wurde (Bauböck 2013a,b), und den drei Kreisen ausgewählt. Die Eingangsdaten für die Ertragsberechnung bestehen aus einem Klimadatensatz aus dem NIBIS® (Niedersächsisches Bodeninformationssystem), das die langjährigen Klimamittelwerte der Klimahauptperiode 1961-1990 plus der Jahre 1991-2000 umfasst (Böhner 2004). Die Klimawerte sind in die Fläche interpoliert und liegen im Maßstab 1:25.000 in Monatsmitteln vor. Zu der Modellierung von Ertragspotenzialen mit langjährig gemittelten Klimawerten muss gesagt werden, dass es hierbei zu Ertragsüberschätzungen kommen kann. Dies liegt darin begründet, dass langjährige Klimamittelwerte nivelliert und somit sehr ausgeglichen sind. Nach einer langjährigen Mittelung von Klimawerten weisen alle 12 Kalendermonate Niederschlagshöhen und Temperaturen auf, die für den Pflanzenbau als günstig einzustufen sind. Abhilfe kann hier ein Anpassungsalgorithmus für die Generierung von Extremjahren schaffen. Für zukünftige Modellierungen von langjährigen Klimamittelwerten ergeben sich jedoch mit der Fertigstellung des Wettergenerators neue Möglichkeiten der Präzisierung in diesem Bereich.

Die Bodendaten sind der Bük50 (Bodenübersichtskarte 1:50.000) entnommen und stammen ebenfalls aus dem NIBIS®. Für eine Maßstabsverfeinerung wurden die Modellergebnisse anschließend an die Bodeneinheiten der Bodenschätzung angepasst (Bauböck 2013a).

3.4.3.3 Darstellung der Biomasse-Ertragsergebnisse

Wie aus Tabelle 3-12 ersichtlich ist, liegt das mittlere Ertragspotenzial für alle vier modellierten Kulturen in Goslar mit 13,19 t/ha an erster Stelle knapp vor Wolfenbüttel (13,14 t/ha) und deutlich vor Hannover (12,10 t/ha). Bei der Einzelbetrachtung der gemittelten Ertragspotenziale liegt Goslar mit 15,34 t/ha für Mais, 14,4 t/ha für Triticale und 11,10 t/ha für Sonnenblume vor Wolfenbüttel (15,05, 14,34, 10,89 t/ha) und Hannover (13,84, 13,44, 9,85 t/ha). Das höchste Ertragspotenzial für Sorghum liegt mit 12,26 t/ha in Wolfenbüttel, gefolgt von Goslar (11,92 t/ha) und Hannover (11,29 t/ha). Die räumliche Verteilung der Ertragspotenziale am Beispiel der Region Hannover ist für die Kulturen Mais, Triticale, Sorghum und Sonnenblume auf den Karten (Abb. 3.21-3.24) ersichtlich.

Die potenziellen Ertragshöhen der drei Landkreise entsprechen in ihrer Sortierung also den mittleren nFKWe-Höhen (Goslar: 210 mm, Wolfenbüttel: 204 mm, Hannover 146 mm), wobei die Differenz von etwa 60 mm, die zwischen den Kreisen Goslar und Wolfenbüttel und der Region Hannover existiert, zu einem mittleren Ertragsunterschied von ca. einer Tonne Trockenmasse pro Hektar führt.

Den hier dargestellten gemittelten Ertragswerten liegen die vom Modell generierten, und auf die Bodenschätzungsflächen angepassten, Einzelflächen der Bodenübersichtskarte 1:50.000 (siehe oben) zugrunde. Die Ertragswerte der Einzelflächen wurden für die Darstellung im GIS zu Klassen aggregiert.

Tabelle 3-12: Maximal-, Minimal- und Mittelwerte der modellierten Erträge für Triticale, Sonnenblume, Silomais und Sorghum sowie selbige für die nFKWe (nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum) und die Bodenpunkte (BP) für die Landkreise Goslar, Hannover und Wolfenbüttel. Quelle: Bauböck (2013a)

	Goslar: 22.354 ha		Ertrag in t/ha				
	nFKWe	BP	Triticale	S-Blume	Mais	Sorgh.	Mittel
Max	276	94	20,26	15,91	22,10	16,89	18,79
Min	41	16	5,53	3,45	4,96	4,37	4,58
Mittel	210	63	14,40	11,10	15,34	11,92	13,19
	Hannover: 94.822 ha		Ertrag in t/ha				
	nFKWe	BP	Triticale	S-Blume	Mais	Sorgh.	Mittel
Max	371	95	20,30	16,91	22,42	17,24	19,22
Min	41	13	5,96	4,12	6,01	4,92	5,25
Mittel	146	44	13,44	9,85	13,84	11,29	12,10
	Wolfenbüttel: 48.612 ha		Ertrag in t/ha				
	nFKWe	BP	Triticale	S-Blume	Mais	Sorgh.	Mittel
Max	283	100	21,48	17,91	22,99	17,87	20,06
Min	41	10	3,69	2,67	3,35	3,35	3,27
Mittel	204	67	14,34	10,89	15,05	12,26	13,14

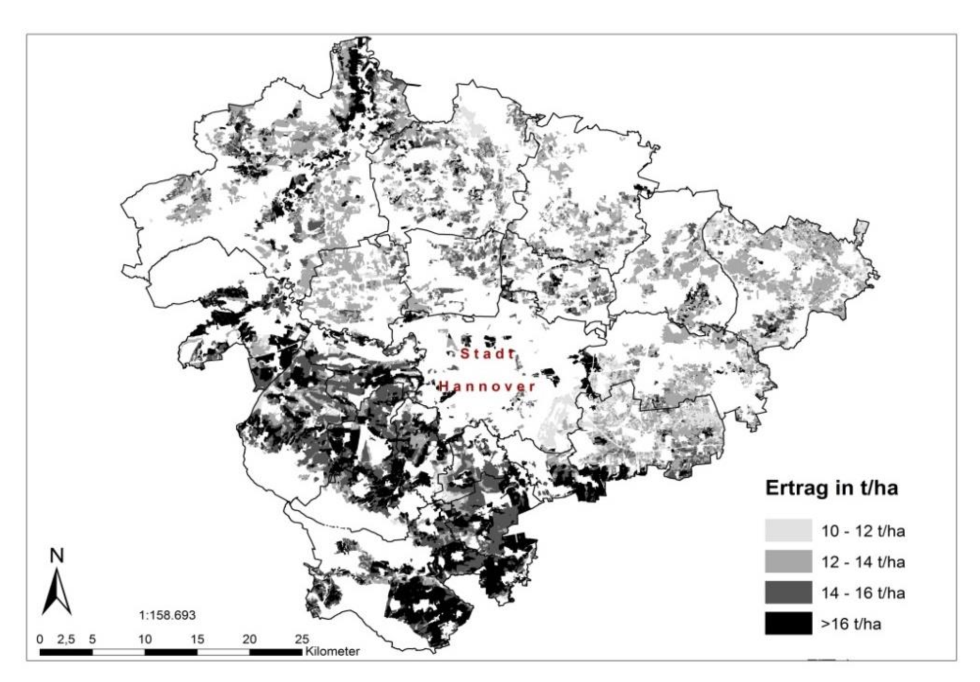


Abbildung 3-21: Ertragspotenzial für Silomais für die Region Hannover, Quelle Bauböck (2013a)

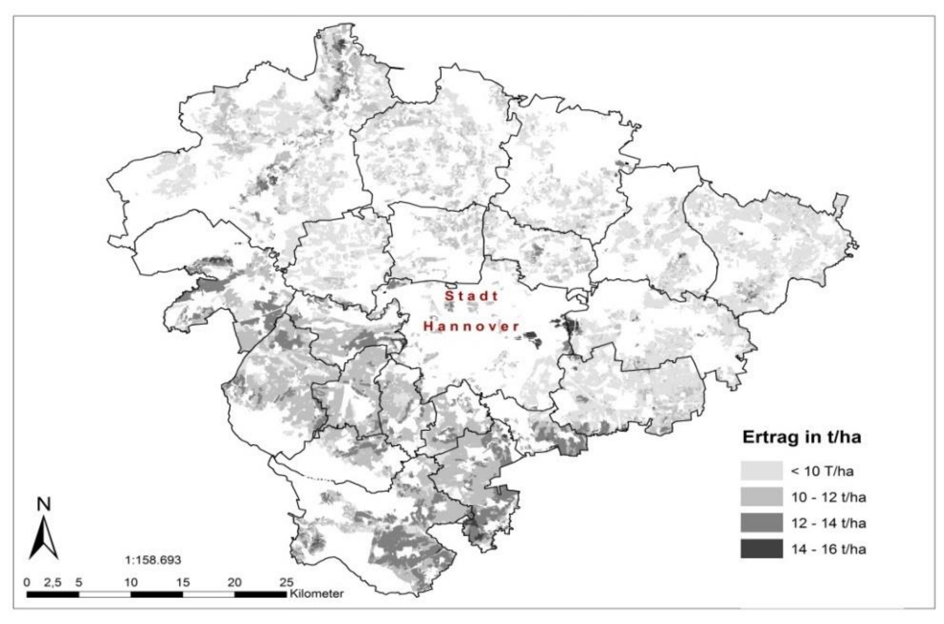


Abbildung 3-22: Ertragspotenzial für Sonnenblumen für die Region Hannover, Quelle: Bauböck (2013a)

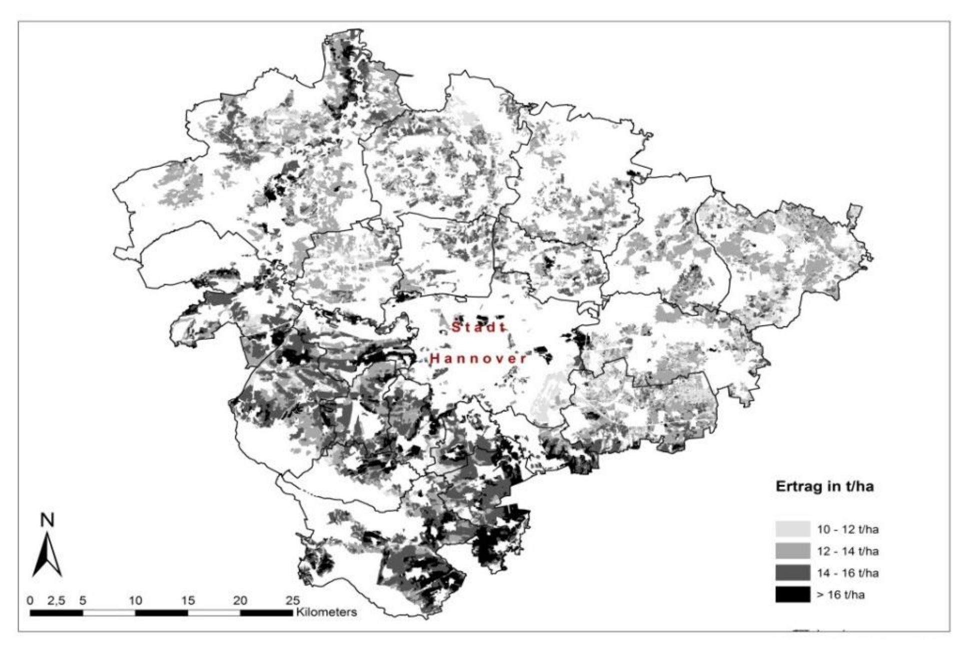


Abbildung 3-23: Ertragspotenzial für Triticale für die Region Hannover, Quelle: Bauböck (2013a)

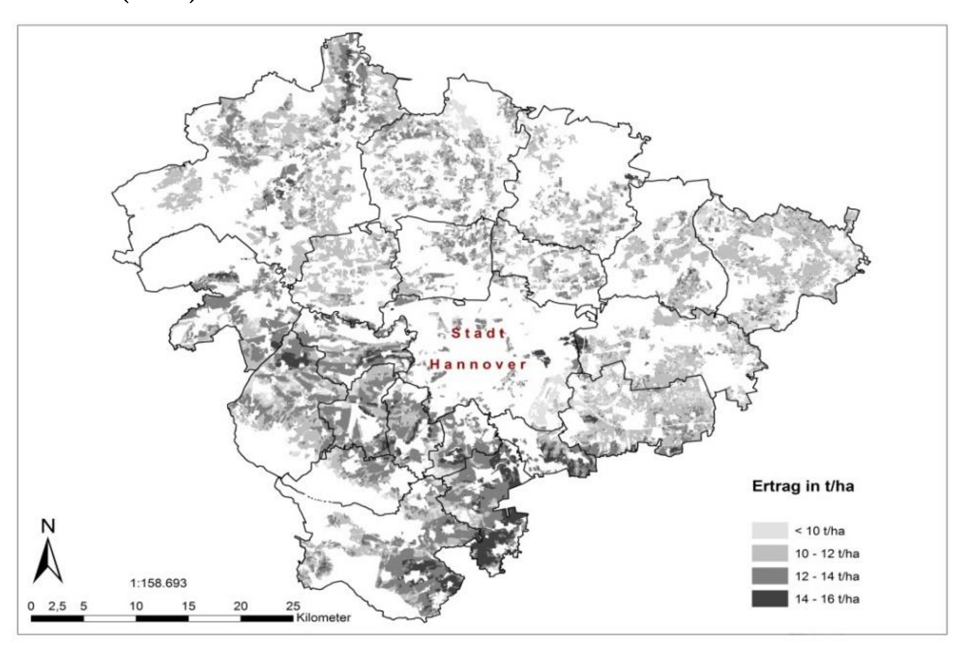


Abbildung 3-24: Ertragspotenzial für Sorghum für die Region Hannover Quelle: Bauböck (2013a)

3.4.3.4 Potenzialszenario für Biomasse und Primärenergie aus Biogas

Mit den gemittelten langjährigen Biomassepotenzialen (Mais, Triticale, Sorghum und Sonnenblume) der drei Landkreise werden nun in einem weiteren Schritt die Gesamtpotenziale aller drei Landkreise für die Trockenbiomasse, den Biogas- und den Methanertrag sowie den Primärenergieertrag berechnet (s. Umrechnungsfaktoren in Tab. 3-13). Für die Berechnung der Trockenmasseerträge wurde ein Energiepflanzenanteil an der Anbaufläche von 30 % zugrunde gelegt.

Tabelle 3-13: Biogas- und Methanerträge (berechnet mit Faustzahlen nach FNR u. LWK) für die vier modellierten Kulturen. Quelle: Bauböck (2013a)

	BG l/kg*	CH_4 %	CH_4 l/kg	kWh/m³	BHKW**
Mais	650	52	338	9,97	87,5
Sorghum	610	52	317	9,97	87,5
Getreide	620	53	329	9,97	87,5
Sonnen-blume	520	57	296	9,97	87,5

* Biogasertrag in Normlitern pro kg TM
** Gesamtwirkungsgrad BHKW in %

Diese 30 % wurden dann auf die vier modellierten Kulturen (Mais, 60 %, Triticale, 20 %, Sonnenblume, 10 %, Sorghum, 10 %) aufgeteilt. Diese Aufteilung wurde willkürlich zu Demonstrationszwecken der Methode vorgenommen und entspricht nicht notwendigerweise dem Anbauspektrum, welches sich auf dem Agrar- und Energiepflanzenmarkt herausbilden würde.

In der Tabelle 3-14 werden die Trockenbiomasse-, Biogas- und Primärenergiepotenziale am Beispiel Goslar wiederum unter Annahme von 30 % Energiepflanzenanbaufläche und entsprechender Fruchtaufteilung (60 %, 20 %, 10 %, 10 %) dargestellt.

Aus den Flächenerträgen (Schritt 1) lassen sich die Erträge nach Flächenanteilen (Schritt 2), Biogas- und Methanerträge (Schritt 3) sowie die Primärenergieerträge in TWh (Schritt 4) errechnen. Die Umrechnungsfaktoren für Silagegewicht zu Methanertrag, Methanmenge zu kWh und Wirkungsgrad eines BHKW finden sich in Tabelle 3-13.

Für Wolfenbüttel und Hannover wurden dieselben Berechnungsschritte ausgeführt. So ergeben sich mit den vier Kulturen und bei einem Energiepflanzenanteil von 30% folgende Biogas-Primärenergiepotenziale (elektrisch plus thermisch) für die drei Landkreise:

Goslar: 0,288 TWh/a
Hannover: 1,077 TWh/a
Wolfenbüttel: 0,634 TWh/a
Gesamt: 1,999 TWh/a

Tabelle 3-14: Umrechnungstabelle Flächenerträge (t/ha) auf Primärenergieertrag für Goslar. Quelle: Bauböck (2013a)

	Faktor Frucht				
	20%	10%	60%	10%	
Kultur	Triticale	S-Blume	Mais	Sorghum	
	Tonnen TM / Jahr				Summe
Schritt 1	332.146	257.175	355.106	274.494	1.218.921
	x 30% x Faktor Frucht				Summe
Schritt 2	19.929	7.715	63.919	8.235	99.798
	1000 m³ Biogas / Jahr				Summe
Schritt 3	6.557	2.284	21.605	2.610	33.055
	TWh Primärenergie / Jahr				Summe
Schritt 4	0,057	0,020	0,188	0,023	0,288

Primärenergiesumme für alle drei Landkreise: 1,999 TWh

Der Maisanteil an der Gesamtagrarfläche würde bei diesem Szenario bei 20% liegen. Mais würde zusammen mit den anderen drei Kulturen für die heute bestehenden, sehr weizenbetonten Fruchtfolgen in Südniedersachsen eine Auflockerung bedeuten. Der Energiepflanzenanbau ist insbesondere dort, wo hohe Maisanteile an den Fruchtfolgen existieren, aber auch dort, wo bisher wenig Mais angebaut wird, in die Kritik geraten. Alternativen zum Mais erscheinen heute daher dringend erforderlich. Aus ökonomischer Sicht ist der Mais für Landwirte und BGA-Betreiber die profitabelste Energiekultur. Allerdings haben Modellierungen mit dem Modell BioSTAR und Praxiserfahrungen (Karpenstein-Machan, 2013) gezeigt, dass in den höheren Lagen der Mittelgebirge und auf schlechteren Böden eine Getreidewinterung dem Mais im Ertrag durchaus überlegen sein kann. In Abbildung 3-25 sind die mit BioSTAR modellierten Ertragsunterschiede zwischen Mais und Triticale für den Landkreis Goslar aus der Klimaperiode 1960-2000 dargestellt. Triticale ist bei dieser Modellierung dem Mais auf allen Flächen unterlegen (im Mittel um etwa 10%). Das für den Mais klimatisch ungünstige Jahr 2003 (starke Sommertrockenheit) war für die Triticale eher günstig (kühles feuchtes Frühjahr) und hat bei der Modellierung Triticaleerträge hervorgerufen, die um bis zu 45% über denen des Mais lagen (Abbildung 3-26). Dies relativiert sich allerdings, da der Mais auf den besseren Böden (gelbe und orangene Flächen) im Jahr 2003 die Triticaleerträge stärker übertrifft als im langjährigen Mittel.

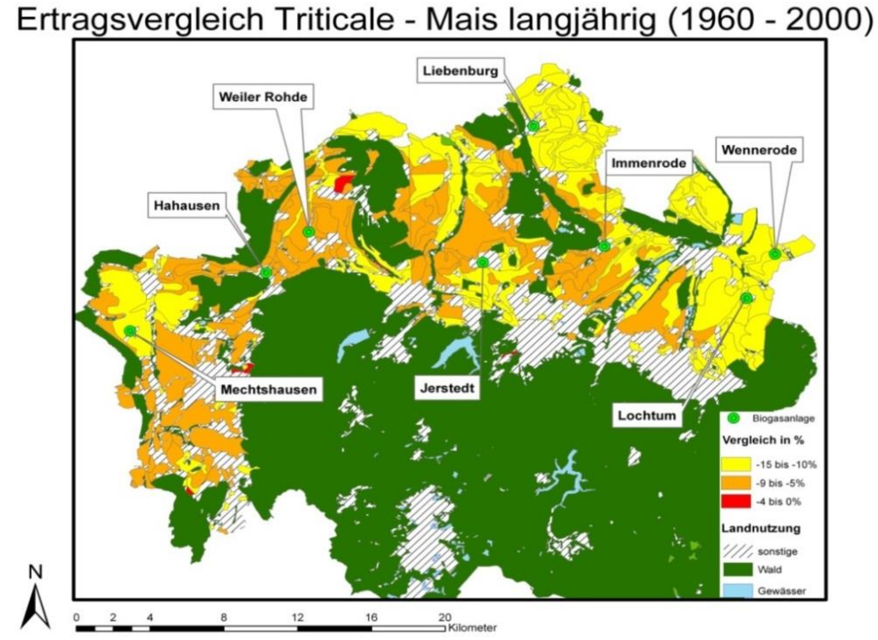


Abbildung 3-25: Modelliertes Minderertragspotenzial von Triticale im Vergleich mit Silomais sowie Standorte von Biogasanlagen im Landkreis Goslar.

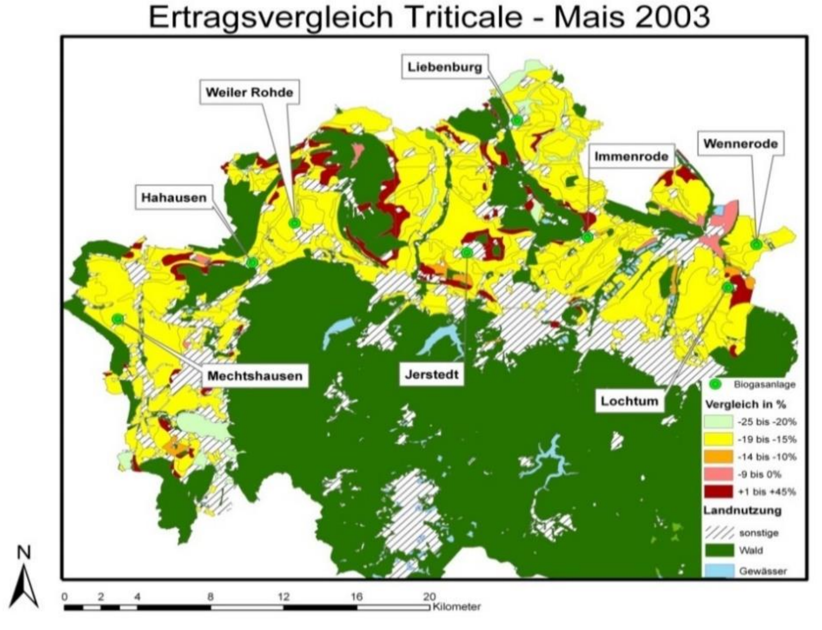


Abbildung 3-26: Modelliertes Minderertragspotenzial von Triticale im Vergleich mit Silomais (Jahr 2003) sowie Standorte von Biogasanlagen im Landkreis Goslar.

3.4.4 Diskussion der Grenzen der Ergebnisse und mögliche Fehlerquellen im Modell

Wie alle Modelle stellt auch das Modell BioSTAR nur einen sehr eng begrenzten Ausschnitt des Gesamt-Wirkungsgefüges zwischen Pflanze, Boden und Atmosphäre dar. Die vollständige Erfassung aller hierbei zum Tragen kommenden Zusammenhänge ist vermutlich kaum zu bewältigen und kann auch bei der Entwicklung eines Modells kaum erstrebenswert sein (Zeitaufwand und Gesamtnutzenverhältnis). Fehlerquellen im hier gezeigten Modellansatz zur Biomasseberechnung existieren in erster Linie in der Erfassbarkeit von Stoffströmen (Wasser, Kohlenstoff) im System Boden, Pflanze und Atmosphäre. Auch die Eingangsdaten (Klima, Boden) können Fehler beinhalten, die z.B. durch Aggregation oder Mittelung von höher aufgelösten Daten entstehen können.

3.4.5 Anwendungsmöglichkeiten für das Modell und Schlussfolgerungen für die Praxis

Das hier vorgestellte Modell hat sich für die Simulation von Biomasseerträgen im Agrarbereich für diverse Kulturen als tauglich erwiesen und kann somit als unterstützendes Werkzeug für die Anbauplanung im Bereich Biomasse, aber auch für den Bereich Nahrungsmittelproduktion herangezogen werden. Insbesondere bei der Allokation von Nahrungsmittel und- Energieproduktion im Agrarbereich kann BioSTAR auf der regionalen und überregionalen Planungsebene einen Beitrag leisten. Fehlentwicklungen (z.B. ein starker Zubau von Biogasanlagen) aber auch eine sinnvolle Integration des Energiepflanzenanbaus in einer Region oder einem Landkreis lassen sich mit diesem Werkzeug von der Ertragsseite, also von der Seite des Flächenpotenzials und der Flächeneffizienz her berechnen. Für zukünftige Entwicklungen kann das Modell wichtige Informationen über klimatisch veränderte Ertragserwartungen beisteuern und aufzeigen, welche Kulturen zukünftig besser oder schlechter an ein sich veränderndes Klima angepasst sein werden.

Literatur

Ad-Hoc-Arbeitsgruppe-Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Auflage.* Hannover: Schweizerbart'sche Veragsbuchhandlung.

Albrizio, R. & Steduto, P. (2005). Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. Radiation use efficiency. *Agricultural and Forest meteorology* 130, 254-268.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*, Rome. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm

Azam-Ali, S.N., Crout, N.M.J. & Bradley, R.G. (1994). Perspectives in modellingresource capture by crops. *Proceedings of the 52nd University of Nottingham Easter School.* S. 125-148. Nottingham University Press.

Batjes, N., Dijkshoorn, K., van Engelen, V., Fischer, G. & Jones, A. (2008). *Harmonized World Soil Database (version 1.0).* Rom, Laxenburg

Bauböck, R. (2013a). *GIS-gestützte Modellierung und Analyse von Agrar-Biomassepotenzialen in Niedersachsen – Einführung in das Pflanzenmodell BioSTAR.* Dissertation. [Online] 15. 02 2013. Gesichtet am 30.4.2017: https://ediss.uni-goettingen.de/bitstream/handle/11858/00-1735-0000-000E-0ABB-9/Diss_Baub%c3%b6ck.pdf?sequence=3 ;
BioSTAR-Webseite (mit Software und Handbuch): https://www.uni-goettingen.de/de/ag-biostar/431252.html

Bauböck, R. (2013b). Modelling Site Specific Biomass Potentials. In Ruppert, H., Kappas, M. & J. Ibendorf (Hrsg.).: *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach.* S. 111-139. Springer, Dortrecht.

Bauböck, R. (2014). Simulating the Yields of Bioenergy and food crops with the crop modeling software BioSTAR –The carbon based growth engine and the BioSTAR ET_0 – method. *Environmental Sciences Europe* 2014, 26:1.

Bauböck, R. & Revilla, C. (ohne Jahr). Benutzerhandbuch für das Pflanzenmodell BioSTAR Version 0.5.5. Gesichtet am 30.4.2017: https://www.uni-goettingen.de/de/benutzerhandbuch/446830.html

Birch, C.J., Hammer, G. L. und Rickert, K.G. (1998). Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (Zea mays). *Australian Journal of Agricultural Research* 49, 249-62.

Böhner, J. (2004). Regionalisierung bodenrelevanter Klimaparameter für das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLfB) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. *Arbeitshefte Boden.* Heft 4.

Boote, K.J. und Loomis, R.S. (1991). The Prediction of Canopy assimilation. M*odeling Crop Photosynthesis - from Biochemistry to Canopy.* CSSA Special Publication No. 19.

Bouman, B.A.M., van Keulen, H., van Laarr, H.H. & Rabbinge, R. (1996). The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* 52(2/3), 171-198.

Chapman, S.C., Hammer, G.L. & Palta, J.A. (1993). Predicting leaf area development for sunflower. *Field Crops Research* 34, 101-112.

Clifton-Brown, J.C., Neilson, B., Lewandowski, I. & Jones, M.B. (2000). The modelled productivity of Miscanthus x giganteus (GREEF et DEU) in Ireland. *Industrial Crops and Products* 12, 97-109.

Elings, A. (2000). Estimation of Leaf Area in Tropical Maize. *Agronomy Journal* 92, 436-444.

Gardener, F., Pearce, R.B. & Mitchell, R.L (1985). *Plant Physiology.* Ames, Iowa: Iowa State University Press.

Gillet, A.G., Crout, N.M.J., Stokes, D.T., Sylvester-Bradley, R. & Scott, R.K. (1999). Simple winter wheat green area index model under UK conditions. *Journal of Agricultural Science* 132, 263-271.

Han, H. Z. (2008). Radiation use efficiency and yield of winter wheat under deficit irrigation in North China. *Plant Soil Environment* 54(7), 313-319.

Jonckheere, I. S. und Fleck, K. Nackaerts, B. Muysa, P. Coppin, Weiss, M. & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121,19-35.

Karpenstein-Machan, M. (2013). Bioenergy villages in Germany: Applying the Göttingen approach of sustainability science to promote sustainable bioenergy projects. In Ruppert, H., Kappas, M. & J. Ibendorf (Hrsg.).: *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach.* S. 37-71. Springer, Dortrecht.

Krieg, D. (1983). Photosynthetic activity during stress. *Agricultural Water Management* 7, 249-263.

Lafarge, T.A. & Hammer, G.L. (2002). Tillering Sorghum over a Wide Range of Population Densities: Modelling Dynamics of Tiller Fertility. *Annals of Botany* 90, 99-110.

Lambert, R., Peeters, A. & Toussaint, B. (1999). LAI evolution of perennial rygrass crop estimated from the sum of temperatures in spring time. *Agricultural and Forest Meteorology* 97, 1-8.

LWK (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2010). Energiepflanzen in Niedersachsen. Oldenburg: Landwirtschaftskammer Niedersachsen.

Mailhol, J. C., Olufayo, A.A. & Ruelle, P. (1997). Sorghum and Sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. *Agricultural Water Management* 35, 167-182.

Monteith, J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Society,* Ser. B. 281, 277-294.

Richter, G.M., Jaggard, K.W. & Mitchell, R.A.C. (2001). Modelling radiation interception and radiation use efficiency for sugar beet under variable climatic stress. *Agricultural and Forest Meteorology* 109, 13-25.

Soltani, A. & Galeshi, S. 2002. Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment: experimentation and simulation. *Field Crops Research* 77, 17-30.

Steduto, P. und Hsiao, T. C. (1998). Maize canopies under two soil water regimes II. Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology* 89, 185-200.

Steduto, P., Hsiao, T.C. & Ferres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science* 25, 189-207.

Tanner, C.B. & Sinclair, T.R. (1983). Efficient water use in crop production: research or re-search?. Taylor, H.M., Jordan, W.R. &. Sinclair, T. R (Hrsg.). *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.* S. 1-25; Madison, WI.: ASA-CSSA-SSSA.

van der Werf, H.M.G., Meijer, W.J.M., Mathijssen, W.W.J.M. & Darwinkel, A. (1993). Potential dry matter production of Miscanthus sinensis in the Netherlands. *Industrial Crops and Products,* 1, 203-210.

Vleeshouwers, L. M. (1998). Potential yield of Miscanthus x giganteus in the Netherlands. *9th International Conference on Biomass for Energy and Industry*. Conference Proceeedings, S. 1017-1019.

Wang, S.H. (2001). Einfluss von Blattstellung und Bestandesdichte auf Ertrag, Qualität, Lichtaufnahme und Blattflächenindex bei Silomaissorten verschiedenen Wuchstyps. *Dissertation an der Humbold Universität Berlin.*

Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 3(11), 1309-1313.

3.5 Optimierung des Energiepflanzenbaus in Hinblick auf Natur und Landschaft

Wiebke Saathoff, Christian Albert, Christina von Haaren, Johannes Hermes, Michael Rode, Felix Neuendorf, Sylvia Herrmann

3.5.1 Problembeschreibung

Der Anbau von Energiepflanzen hat zahlreiche Auswirkungen auf Natur und Landschaft (Reich & Rüter 2011). Die konkreten Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf Natur und Landschaft können jedoch in Abhängigkeit von der Intensität der Wirkfaktoren, aber auch der Empfindlichkeit des Standortes gegenüber den Bewirtschaftungseinflüssen räumlich stark variieren. Unterschiede gibt es hier nicht nur zwischen einzelnen Regionen (z.B. Veredelungsregion, Ackerbauregion), sondern auch generell zwischen den räumlichen Planungsebenen ‚Schlag' bzw. ‚Betrieb' und ‚Region' (SRU 2007; Rode & Kanning 2010). Um Lösungsansätze zur Vermeidung und Behebung möglicher negativer Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus entwickeln zu können, bedarf es daher einer räumlich differenzierten Betrachtung, die sowohl zwischen verschiedenen einzelnen Regionen als auch zwischen den unterschiedlichen Planungsebenen unterscheidet. Diese findet derzeit in der Praxis jedoch nicht bzw. nur unzureichend statt. Insbesondere die Analyse der Betriebsebene und deren Vernetzung mit höheren Skalenebenen war vernachlässigt worden und damit auch Versuche, die Selbstregulation durch den Landwirt zu stärken. Ursachen hierfür mögen sein a) die Komplexität der Aus- und Wechselwirkungen des Anbaus von Energiepflanzen und anderen Fruchtarten auf verschiedene Landschaftsfunktionen auch im Hinblick auf verschiedene räumliche Ebenen sowie b) fehlende Methoden zur räumlich abgestimmten Erfassung und Bewertung dieser Wechselwirkungen.

Mit der Betriebsmanagementsoftware MANUELA (von Haaren et al. 2008) existiert zwar eine Grundlage für derartige Erfassungen und Bewertungen auf der Betriebsebene. Für eine hinreichende Bewertung von Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf den Arten- und Klimaschutz fehlten aber auch in MANUELA bislang die geeigneten Werkzeuge. So bewerten die bereits vor Projektbeginn in MANUELA bestehenden Funktionen im Bereich des Artenschutzes vor allem die generelle Qualität des Biotoptyps (s. von Haaren et al. 2012, Bierhals et al. 2004) sowie die Biotopverbundqualität gehölzartiger Landschaftselemente. Der Einfluss verschiedener Flächenbewirtschaftungsmethoden und Anbaukulturen (z.B. im Energiepflanzenanbau) auf die Lebensraum- und Lebensraumverbundqualität konnte damit aber nur begrenzt eingeschätzt werden. Für die Bewertung der Wirkungen von Landnutzungen und Landnutzungsänderungen auf die Entstehung

von Treibhausgasen (THG) existierte bislang kein Instrument. Weitere Defizite zur Bewertung der Energiepflanzenproduktion durch MANUELA bestanden auf der regionalen Ebene. Hierzu existierten zwar grundlegende Bewertungsmethoden zu den Landschaftsfunktionen aus der Landschaftsrahmenplanung. Diese enthielten jedoch ebenfalls keine Methoden zur Bewertung der Klimaschutzfunktion. Zudem fehlte es an Methoden, um die Steuerungsverantwortung im Bereich Biomasseanbau auf dieser Ebene in Abgrenzung zur Betriebsebene und zu höheren politischen Entscheidungsebenen zu definieren.

3.5.2 Ziel

Ziel dieser Arbeit war es, über eine Weiterentwicklung der Betriebsmanagementsoftware MANUELA einen Beitrag zu einer räumlich mehrdimensionalen differenzierteren Folgenbewertung des Energiepflanzenanbaus auf die Biodiversität sowie die Klimaschutzfunktion der Böden zu leisten und Maßnahmenempfehlungen zur Konfliktlösung und zu Synergiepotenzialen abzuleiten. Hierzu sollten Methoden zur Bewertung möglicher Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf beide oben genannten Naturgüter für den Einsatz in der GIS-gestützten naturschutzfachlichen Betriebsmanagementsoftware MANUELA entwickelt und diese auf die regionale Ebene übertragen werden. Ferner sollte ein Ansatz entwickelt werden, wie man Wirkungen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen abbilden und daraus Hinweise zur Verteilung von Steuerungsverantwortung ableiten kann.

Um die Wirkungen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen zu demonstrieren, arbeitete das Teilprojekt sowohl auf der Betriebs- als auch der Regionsebene:

Auf der *Ebene eines landwirtschaftlichen Betriebes* sollten folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie müssen Bewertungs- und Maßnahmen-Tools in MANUELA (Zielgruppe: Landwirte und Berater) für die Bewertung der Auswirkungen des Biomasseanbaus auf Arten und Biodiversität sowie auf den Klimaschutz ausgebaut bzw. neu entwickelt werden?
- Welche Kapazitäten und Motive haben Landwirte, um ihren Energiepflanzenanbau hinsichtlich Arten- und Klimaschutz zu optimieren?
- Welche Rolle spielen räumlich schlaggenau dargestellte Informationen über Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus und potenzieller Schutzmaßnahmen sowie deren Kosten auf die Maßnahmenbereitschaft von Landwirten?

Insbesondere im Hinblick auf die beiden letzten Fragen sollte über eine Befragung herausgefunden werden, ob ein ökologisch angepasster Energiepflanzenanbau gemäß dem Subsidiaritätsprinzip auf der Betriebsebene initiiert werden kann.

Auf der *regionalen Ebene* wurden sowohl die auf Betriebsebene erzielten Ergebnisse als auch die möglichen Konflikte des Energiepflanzenanbaus mit anderen Funktionen der Landschaft, die nicht auf der Betriebsebene gelöst werden (können), wieder aufgenommen und mit regionalen Analysen zu regional relevanten

Biomasseauswirkungen verglichen. Damit sollten unter anderem auch Auswirkungen und Konflikte abgebildet werden, die nicht auf der Betriebsebene sichtbar werden. Die Untersuchung widmete sich auf der regionalen Ebene den Fragen:

- Welche möglichen Auswirkungen haben regionale Szenarien zum Anbau von Energiepflanzen auf die räumliche Fruchtartenverteilung und das Angebot von Ökosystemleistungen?
- Wie kann räumliche Planung helfen, bisher unberücksichtigte Skalenprobleme bei der Energiepflanzenproduktion zu erkennen und angemessene Steuerungsmechanismen zu entwickeln?

Die Beantwortung dieser Fragen sollte nicht nur räumliche Analysen, sondern auch die Perspektive von Vertretern von Planungsinstitutionen einbeziehen.

Im Folgenden werden Methoden (Kap. 3.5.3) zur Beantwortung der gestellten Forschungsfragen sowie deren Ergebnisse (Kap. 3.5.4) erläutert. Möglichkeiten der Anwendung der Ergebnisse sowie entsprechende Einschränkungen werden in Kapitel 3.5.6 diskutiert. Die sich aus den Inhalten und der Reflexion der Ergebnisse ergebende Relevanz für die Planungspraxis wird in Kapitel 3.5.7 zusammengefasst dargestellt.

3.5.3 Methoden

3.5.3.1 Methoden für Analysen auf der Betriebsebene

Um die Folgen des Energiepflanzenanbaus auf der Betriebsebene bewerten zu können, wurde die naturschutzfachliche Betriebsmanagementsoftware MANUELA weiterentwickelt. Die Open-Source-GIS-gestützte Software MANUELA dient der schlaggenauen Bewertung landwirtschaftlicher Nutzungseinflüsse auf unterschiedliche Naturgüter (von Haaren et al. 2008; von Haaren et al. 2012). Da für einige Naturgüter bereits ausreichende Bewertungswerkzeuge in MANUELA implementiert waren, wurde das vorhandene Bewertungsspektrum von MANUELA im defizitären Bereich des landnutzungsbezogenen Arten- und Klimaschutzes ausgebaut.

Mit der Entwicklung eines weiteren MANUELA-Tools können nun verschiedene Acker- und Grünlandbewirtschaftungsmethoden (auch im Energiepflanzenanbau praktizierten) im Hinblick auf ihre Wirkung auf den Artenschutz bewertet werden. Da jedoch die meisten Bewirtschaftungspraktiken in den unterschiedlichen Produktionsbereichen (Energiepflanzenanbau, Lebens- und Futtermittelproduktion) identisch sind (Unterschiede bestehen in der Fokussierung auf bestimmte Kulturarten; s. Wiehe et al. 2010a), wurde es nicht als sinnvoll erachtet, die Bewertungsfunktionen des neuen MANUELA-Tools auf den Energiepflanzenanbau zu reduzieren. Es ist folglich für alle landwirtschaftlichen Produktionsbereiche anwendbar. Das Bewertungstool basiert auf Literaturdaten (Fuchs & Stein-Bachinger 2008; van Elsen & Daniel 2000; Schertler & Bielau 2010; Müller-Sämann et al. 2003), ergänzt durch eigene Einschätzungen. Im Rahmen des Projektes wurde es

auf drei Testbetrieben erprobt. Dabei wurden auch die bereits vorhandenen MANUELA-Funktionen zur Bewertung der Lebensraumverbundqualität sowie des Biotopentwicklungspotenzials (nach von Haaren 2004) eingesetzt. Aus den Ergebnissen können Biotopverbund- und Biotopentwicklungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Das neu entwickelte Werkzeug zur Bewertung von CO_2-Emissionen ist fokussiert auf CO_2-Emissionen aus landwirtschaftlicher Moornutzung und Grünlandumbruch. Aus Messwerten aus der Literatur (Moorstandorte; Höper 2007, 2008, 2009a; Drösler et al. 2011) und Daten des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) über bodentypspezifische C-Vorratsunterschiede für mineralische Grünland- und Ackerstandorte für Niedersachsen (Höper 2009a,b) wurde eine bodentypspezifische Bewertungsskala für Auswirkungen landwirtschaftlicher Moornutzung und Grünlandumbruch auf die CO_2-Freisetzung entwickelt. Für die Bewertung der N_2O-Emissionen wurde das Modell MODE des Thünen-Instituts (Dechow et al. 2011) für den Einsatz in MANUELA operationalisiert (s. Saathoff et al. 2013). Die zur Erfassung und Bewertung der THG-Entstehung aus Landnutzung und Landnutzungsänderung entwickelten Tools wurden ebenfalls auf den drei Testbetrieben angewandt und kalibriert.

Durch die Auswertung digitalen Kartenmaterials zu Schutzgebieten und Boden- und Klimaparametern sowie durch die parallele Anwendung der MANUELA-Tools zur Ermittlung des Biotopwertes und des Biotopentwicklungspotenzials wurden sowohl empfindliche Standorte für die Artenvielfalt als auch für den Klimaschutz auf den drei Testbetrieben ermittelt. Auf dieser Basis konnten Maßnahmen entwickelt, dokumentiert und in MANUELA integriert werden, durch deren Anwendung gleichermaßen Schadwirkungen auf den Arten- und den Klimaschutz vermieden bzw. Synergien für beide Schutzfelder gestärkt werden können.

Die Ergebnisse der naturschutzfachlichen Bewertung der drei Testbetriebe sowie die für MANUELA erstellten Maßnahmenvorschläge wurden zur Beantwortung der in Kap. 3.5.2 für die Betriebsebene genannten Forschungsfragen weiterverwendet. Zentrales Ziel dabei war es zu überprüfen, ob die (weiter-)entwickelten Tools in MANUELA in der Lage sind, einen Lernprozess über die Wirkungen und Maßnahmenpotenziale des Energiepflanzenanbaus bei den Landwirten anzustoßen. Dabei sollte geprüft werden, ob und auf welche Motive gegründet dieser Lernprozess zu einer gesteigerten Bereitschaft führt, Maßnahmen zum Umweltschutz durchzuführen. In einem ersten Schritt wurden dazu die drei Testlandwirte im Rahmen eines leitfadengestützten Experteninterviews befragt. Hierbei wurden Elemente des problemzentrierten sowie des fokussierten Interviews integriert (Flick 2010). Grundlage der Interviews waren die in MANUELA generierten Karten zu Bewertungen und Maßnahmenempfehlungen sowie weiteres Informationsmaterial wie Tabellen und Bilder. Auf den Einsatz geographischer und thematischer Karten zur Visualisierung der vermittelten Information wurde deshalb großer Wert gelegt, da diese Darstellungsform Denk-, Lern- und Kommunikationsprozesse anregen kann (Schnotz 2002; Verdi et al. 2002).

Am Beginn des Interviews wurden die Landwirte um eine Selbsteinschätzung zu Auswirkungen ihres Energiepflanzenanbaus und des weiteren Flächenmanagements auf Natur und Landschaft gebeten. Sie wurden zudem befragt, ob sie ohnehin vorhaben, Maßnahmen zur ökologischen Optimierung ihrer Bewirtschaftung zu ergreifen. In einem zweiten Schritt wurden den Landwirten die Bewertungsergebnisse zu den Umweltwirkungen aus MANUELA vorgelegt, und sie wurden erneut befragt, ob sie ihre Bewirtschaftung anpassen möchten. Zur Entscheidungsunterstützung wurden ihnen mögliche Schutzmaßnahmen vorgeschlagen. Da sich der Gesamtdeckungsbeitragsrechner zu diesem Zeitpunkt noch in der Entwicklung befand, konnten noch keine genauen Maßnahmenkosten benannt werden. Die Landwirte sollten daher auf die Frage antworten, zu welchem Deckungsbeitrag im Vergleich zur derzeitigen Bewirtschaftung (geringer, gleichbleibend, höher) sie die vorgeschlagenen Maßnahmen umsetzen würden.

Die Interviewergebnisse wurden qualitativ ausgewertet, da die Anzahl der Befragten beim Experteninterview aufgrund der aufwendigen Erhebungen auf der Betriebsebene limitiert werden musste und damit der Stichprobenumfang für eine quantitative Auswertung zu gering war. Hierzu wurde die Auswertungssoftware „Makrosammlung für die qualitative Inhaltsanalyse“ (MIA, Gläser & Laudel 2010) angewendet. Die Ergebnisse erbrachten einerseits wertvolle Hinweise über Motive und Kapazitäten eines angepassten Energiepflanzenanbaus, lieferten andererseits jedoch zu wenig Aufschluss über die Bedeutung räumlich-konkreter Umweltinformationen für Maßnahmenentscheidungen. Aus diesem Grund wurde eine weitere Untersuchung mit der Methode des ‚Discrete Choice Experiment‘ (DCE) vorgenommen. Dabei wurde der Einfluss von Information zu Umweltauswirkungen sowie zu Maßnahmenpotenzialen und deren Kosten auf die Bereitschaft von sieben Energiepflanzenanbauern, ihr Betriebsmanagement ökologisch zu optimieren, ermittelt. Als Basis diente ein visualisierter, fiktiver Energiepflanzenanbaubetrieb. Den Landwirten wurden nacheinander Informationen über a) das fiktive Status-quo-Management des Betriebs, b) die Umweltwirkungen und mögliche Anpassungsmaßnahmen und c) die Kosten der Maßnahmen über die Anwendung der für MANUELA zum Deckungsbeitragsrechner angepassten Linearen Programmierung (LP; vgl. Kap. 3.3.3.4) mitgeteilt. Zu jedem Bewertungsaspekt stand den Landwirten eine als Karte visualisierte Auswahl an Bewirtschaftungsalternativen zur Verfügung (Tabelle 3-15). Dabei flossen z.B. zur Bewertung der Lebensraumqualität dieser Alternativen die Parameter Anzahl an Kulturarten, Hecken und Blühstreifen ein. Mit dem Anstieg der Kulturartenzahl und der Zahl an Landschaftselementen stieg die mit dem Shannon-Index (Magurran 2004) berechnete Lebensraumqualität i.d.R. an. Die in Bezug hierauf fiktiv angenommenen Worst-Case-Bewirtschaftungsvarianten befanden sich dabei am unteren, die Best-Practice-Beispiele am oberen Ende einer Ziffern-/Nummernskala.

Tabelle 3-15: Wählbare Bewirtschaftungsalternativen im ‚Discrete Choice Experiment' zur Bewertung der/des potenziellen Lebensraumqualität, Bodenabtrages und CO_2-Emissionsrisikos

Bewirtschaftungsalternativen zur Bewertung der Lebensraumqualität (Artenschutz)	
Kulturarten	
A	Mais: 52%, Winterweizen (WW)/Wintergerste (WG): 34%, Kartoffeln: 14%
B*[12]	Mais: 38%, WW/WG: 31%, Kartoffeln: 18%, Raps: 13%
C	Mais: 18% Mais, WW/WG: 25%, Kartoffeln: 16%, Winterroggen (WR): 24%, Raps: 11%
D	Mais: 15%, WW/WG: 20%, Kartoffeln: 14%, Raps: 12%, Hafer: 10%, WR: 14%, Zuckerrübe (ZR): 11%, Silphie: 4%
Hecken	
i*	geringer Heckenanteil
ii	mittlerer Heckenanteil
Blühstreifen	
0*	0 % Blühstreifenanteil an Gesamt-Ackerfläche
1	1 % Blühstreifenanteil an Gesamt-Ackerfläche
3	3 % Blühstreifenanteil an Gesamt-Ackerfläche
7	7 % Blühstreifenanteil an Gesamt-Ackerfläche
Bewirtschaftungsalternativen zur Bewertung des Bodenabtrages durch Wind erosion (Bodenfruchtbarkeit)	
A*	Mais
B	Mais mit überwinternden Stoppeln
C	Mais mit Untersaat (überwinternd) ODER Wintergetreide
D	Mais mit Untersaat (überwinternd) ODER Wintergetreide UND Windschutzstreifen in Hauptwindrichtung
E	Dauerkultur ODER Mais mit Untersaat (überwinternd) bzw. Wintergetreide UND Windschutzstreifen in Hauptwindrichtung UND Nebenschutzstreifen
Bewirtschaftungsalternativen zur Bewertung des CO_2-Emissionsrisikos durch Grünlandumbruch (Bewertungsparameter: Bodentyp pro Schlag)	
A	Niedermoor, Pseudogley, Gley (alle Flächen)
B	Niedermoor, Pseudogley
C	Niedermoor, Gley
D	Niedermoor
E	Pseudogley, Gley
F	Pseudogley
G	Gley
H*	kein Umbruch

[12] Die mit * markierten Bewirtschaftungsalternativen kennzeichnen die Status-quo-Variante im ‚Discrete Choice Experiment'. Im Falle der Winderosionsbewertung befinden sich die Bewirtschaftungsalternativen auf Flächen mit einer sehr hohen Winderosionsgefährdungsstufe (EfA 5, vgl. Müller & Waldeck 2011).

Die verschiedenen Informationen zu den Bewirtschaftungsalternativen im Hinblick auf Lebensraumqualität, Bodenabtrag und CO_2-Emissionsrisiko wurden den Landwirten nacheinander vorgestellt. Nach jeder neuen Information wurden die Teilnehmer gefragt, ob sie etwas an ihrem Flächenmanagement ändern möchten. Aus den differierenden Antworten nach jeder neuen Informationsschicht wurden Schlussfolgerungen über den Einfluss der Information gezogen.

Im DCE machten der Geografische Informations-System (GIS)-Einsatz und der umfassende, komplexe Fragenkatalog eine jeweils individuelle Betreuung der Testpersonen erforderlich und begrenzte somit die Anzahl auswählbarer Alternativen sowie die Teilnehmerzahl auf die geringe Stichprobenanzahl 7. Die Ergebnisse wurden deshalb ebenfalls qualitativ ausgewertet.

3.5.3.2 Methoden zur Analyse auf der regionalen Ebene

Zur Beantwortung der Forschungsfragen mit Bezug auf die regionale Ebene wurden zwei Forschungsansätze verfolgt: a) eine szenariobasierte Analyse potenzieller Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf der regionalen Ebene sowie b) eine exemplarische Untersuchung ausgewählter, Ebenen-übergreifender Wechselwirkungen zwischen Energiepflanzenanbau und ausgewählten Ökosystemleistungen.

Als Fallbeispiel wurde die Region Hannover gewählt. Die Region ist durch zwei unterschiedliche Landschaftstypen gekennzeichnet, die sich in den dominierenden Ackerkulturen widerspiegeln. Auf den fruchtbaren Böden der Bördelandschaft im Süden Hannovers dominieren Weizen- und Zuckerrübenanbau. Auf den eher sandigen, weniger fruchtbaren Böden der Geestlandschaft im Norden Hannovers werden vermehrt Mais, Gerste oder auch Roggen angebaut. Auch der Grünlandanteil ist dort wesentlich höher. Biogasanlagen kamen im Jahr 2012 fast ausschließlich im Norden der Region vor. Ihre Leistung belief sich auf 19729 kW. Insgesamt wurden 2012 11% der Ackerflächen in der Region mit Mais bestellt. Der Anteil des Energiemais an der Ackerfläche betrug 6%.

Die Analyse von Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf Natur und Landschaft einer Region steht prinzipiell vor komplexen Herausforderungen. Bisher liegt nur unvollständiges Wissen über die komplexen Wechselwirkungen des Anbaus verschiedener Fruchtarten auf unterschiedliche Landschaftsfunktionen bzw. Ökosystemleistungen vor. Vorhandende Daten, wie bspw. die im INVEKOS-System erfassten Informationen zur Verteilung von Fruchtarten auf den Ackerflächen oder die genauen Standorte der Biogasanlagen in der Region Hannover, konnten aus datenschutzrechtlichen Gründen für diese Arbeit nicht zur Verfügung gestellt werden. Eine weitere Herausforderung ist die Schwierigkeit der Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der Landwirtschaftspolitik, des Agrarmarktes sowie des individuellen Verhaltens der Landwirte in der Region Hannover. Hinzu kommen zusätzliche Einflüsse durch den voranschreitenden Klimawandel.

Um unter diesen Bedingungen mögliche Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf Natur und Landschaft analysieren zu können, bot sich die Szenari-

omethode an (vgl. Alcamo et al. 2008; Albert et al. 2012). Bei dieser Methode werden plausible Annahmen über zukünftige Entwicklungen getroffen, mögliche Auswirkungen auf die Landnutzung simuliert und potenzielle Effekte auf Natur und Landschaft abgeschätzt. Als Fallbeispiel wurde die Region Hannover betrachtet, mit Fokus auf den Anbau von Energiemais als der derzeit wichtigsten Fruchtart für die Biogasproduktion. Die berücksichtigten Ökosystemleistungen waren Lebensräume (Indikator: Ackerbiotopindizes), die Nahrungsmittelproduktion (Indikator: Selbsternährungsgrad der Region) sowie das Landschaftsbild (Indikator: Fruchtartendiversität). Das Vorgehen gliederte sich in drei Schritte: a) Erstellung einer Landnutzungskarte mit dem Status quo der Fruchtartenverteilung und der Biogasproduktion, b) Entwicklung von Szenarien und Simulation entsprechender Landnutzungsänderungen und c) Analyse der Szenrioauswirkungen auf die ausgewählten Ökosystemleistungen. Detailliertere Informationen zum Vorgehen finden sich z.B. in von Haaren (2014) und Albert et al. (2014, 2016).

Die Erstellung der Landnutzungskarte für das Ausgangsjahr 2012 basierte auf Grundlagendaten aus der Biotoptypenkartierung der Region Hannover (2010) und der Landwirtschaftszählung zur Bodennutzung auf Gemeindeebene von 2010 des Landesbetriebs für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen (LSKN 2010). Zu den existierenden Biogasanlagen wurden keine detaillierten Daten bereitgestellt, sodass auf die zum Teil ungenauen Informationen des Onlineservice EnergyMap.info (2017; Daten für 2012) zurückgegriffen werden musste. Berücksichtigt wurden nur Anlagen mit mindestens 100 kW Leistung. Für die Simulation des Flächenbedarfs der Anlagen wurde von 0,36 ha Anbaufläche pro 1 kW Leistung ausgegangen, wovon bis 2012 ca. 80% mit Mais bestellt sind. Eine weitere Annahme bestand darin, dass der Flächenbedarf der Anlagen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit hauptsächlich in einem bestimmten Umkreis um die Anlagen, dem Einzugsgebiet (EZG), gedeckt wird. Dieses EZG wächst mit zunehmender Anlagengröße aufgrund des entsprechend höheren Flächenbedarfs. Als Radien der EZGs wurden 1,5 km für Anlagen bis 255 kW, 3 km für solche mit 256 bis 400 kW und 5 km für Anlagen mit mehr als 400 kW angenommen. Zur Simulation der Verteilung der Fruchtarten wurde zunächst Mais entsprechend des Bedarfs der bis 2009 gebauten Anlagen innerhalb der EZGe nach dem Zufallsprinzip verteilt. Sofern die Anbaufläche für Mais in der jeweiligen Gemeinde und dem Szenario größer war als die bereits verteilte Menge an Mais zur Deckung des Bedarfs der Biogasanlagen, wurde der verbleibende Flächenanteil von Mais zufallsverteilt. Der nächste Schritt bestand in der Zufallsverteilung der Flächenanteile der anderen Fruchtartengruppen entsprechend der Agrarstatistik auf Gemeindeebene. Es folgte die Simulation des Maisbedarfs der zwischen 2010 und 2012 gebauten Anlagen, wobei von einem Rückgang von Gerste zu Gunsten des zusätzlichen Maisanbaus ausgegangen wurde. Die Verteilung erfolgte zufällig innerhalb der EZGe. Die Simulation der Fruchtartenveränderungen in den Szenarien wurde ebenfalls mittels einer Zufallsverteilung auf Gemeindeebene vorgenommen.

Insgesamt wurden mehrere Szenarien mit einem Zeithorizont bis 2050 simuliert. Das *Biogasszenario* erkundet mögliche Auswirkungen eines stark gesteigerten Bioenergiepflanzenanbaus. In diesem Szenario wird, in Anlehnung an die Ergebnisse eines Szenario-Workshops zum Thema ‚Ausbau erneuerbarer Energien' mit Verwaltungsfachleuten der Region Hannover am 6. September 2012, eine erhebliche Steigerung der aus Biogasanlagen generierten Leistung von 19.729 kW auf 75.100 kW angenommen. Damit einhergehend kommt es zu einem um das 2,8-fache erhöhten Flächenbedarf. Um die lokalen Kontextbedingungen wie bspw. Standorteigenschaften, Agrarstruktur und Anbaupräferenzen der Landwirte zu berücksichtigen, wurde die bisherige Verteilung der Biogasanlagen (Stand 2009) als Ausgangspunkt genommen. Darüber hinaus wurden gemeindespezifische Steigerungsraten des Anbaus von Energiepflanzen vom jeweiligen Status quo (2009) ausgehend angenommen.

Das *zweite Szenario* orientiert sich an Naturschutzvorgaben und beinhaltet verschiedene Restriktionen für den Energiepflanzenanbau. Hierzu zählen Ausschlussgebiete wie Naturschutzgebiete, Trinkwasserschutzgebiete, Überschwemmungsgebiete, erosionsgefährdete Flächen und faunistische Werträume. Zusätzlich wurde festgelegt, dass in jeder Gemeinde maximal 15% der nicht in den Restriktionsgebieten liegenden Ackerflächen mit Mais bestellt werden dürfen. Diese 15% wurden in der Simulation ausgeschöpft.

Das *dritte Szenario* stellt eine weniger restriktive Variante des zweiten dar. Unter der Bedingung einer strikten Einhaltung der guten fachlichen Praxis bzw. der Ergreifung adäquater Maßnahmen soll hier der Anbau von Energiemais auf erosionsgefährdeten Flächen und in faunistischen Werträumen auch weiterhin zulässig sein.

Für ein *viertes Szenario* wurden mögliche Standorte neuer Biogasanlagen und insbesondere die Verteilung der Anbauflächen von den Ergebnissen des BioSTAR-Modells (Bauböck 2013, siehe Kap. 3.4) für die Region Hannover abgeleitet. In einem Workshop zur Validierung der Szenarioannahmen mit Stakeholdern und Landwirten wurde dieses Szenario jedoch als zu unrealistisch bewertet, da zwar Potenziale berechnet, die jeweilige Konkurrenzsituation mit anderen Fruchtarten und andere relevante Faktoren aber nicht berücksichtigt wurden. Dieses Szenario wurde daher nicht weiter berücksichtigt.

Neben der zuvor beschriebenen Methodik zur Ableitung von Landnutzungsszenarien wurde ein weiteres Verfahren unter Verwendung des Landnutzungsallokationsmodells CLUE-S getestet. Dieses ermöglicht eine flächenscharfe Allokation der zukünftigen Landnutzung. Dieser Test wurde für den Landkreis Hildesheim durchgeführt, da nur dort die notwendigen Daten zur Verfügung standen. CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects; Veldkamp & Fresco 1996; Verburg 2010) kann auf Basis eines iterativen Allokationsprozesses zukünftige Flächenentwicklungen von Landnutzungen in einem Raum simulieren. Die Simulation mit CLUE-S besteht aus zwei Teilen. Einerseits erfolgt eine vom Raum unabhängige Analyse der Antriebskräfte zukünftiger Landnutzungsänderungen, die zukünftige Anteile von Landnutzungen im Szenario beschreibt („Bedarf" an Landnutzungen). An-

schließend werden die lokalen Einflussfaktoren für die Allokation im Gebiet beschrieben. CLUE-S verortet dann die Landnutzungen entsprechend des berechneten Bedarfs unter Berücksichtigung der lokalen Einflussfaktoren und stellt dies in einer Karte dar. Auf diese Weise können die mittels des Simulationsmodells 100PROSIM errechneten Änderungen in den Anbauumfängen von Bioenergiepflanzen räumlich verortet und visualisiert werden.

Für die Simulation der drei Szenarien wurden folgende weitere Annahmen getroffen: Bei einer Steigerung des Anbaus von Mais muss zwangsläufig von einer Abnahme der Anbaufläche für andere Fruchtarten ausgegangen werden. Dabei wurde angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Abnahme der Anbaufläche einer Fruchtart von der Höhe des potenziellen Deckungsbeitrags sowie der Wahrscheinlichkeit ihrer Substituierung im Betriebsablauf abhängig ist. Fruchtarten mit niedrigen potenziellen Deckungsbeiträgen verlieren zuerst an Flächenumfang. Folgende Reihenfolge in der Abnahme von Flächenanteilen wurde angenommen, wobei für keine Fruchtart eine Verminderung der Anbaufläche um mehr als 90% gegenüber 2012 angenommen wurde: zuerst Gerste, dann Zuckerrüben und Raps, danach Roggen, Weizen und zuletzt Kartoffeln. Der Anteil an Mais für die tierische Veredelung wird in den Szenarien konstant gehalten gegenüber der Situation 2012. Die Berechnung der produzierbaren Leistung der Biogasanlagen für 2050 berücksichtigt keine Produktivitätssteigerungen, sondern nimmt weiterhin eine Relation von 2,78 kW pro 1 ha Energiepflanzenfläche (entspricht 0,36 ha benötigte Anbaufläche pro 1 kW Anlagenleistung; mittlerer Flächenbedarf berechnet entsprechend ML 2010) und einen Maisanteil von 60% an. Die Substratzusammensetzung zur Deckung der restlichen 40% des Energiepflanzenbedarfs bleibt undefiniert. Solche Korrekturen könnten bei Vorliegen genauerer Daten zu einem späteren Zeitpunkt problemlos in das Modell einbezogen werden.

Für die Analyse der Auswirkungen der Anbauszenarien auf Lebensräume (Indikator: Ackerbiotopindizes), die Nahrungsmittelproduktion (Indikator: Selbsternährungsgrad der Region) sowie das Landschaftsbild (Indikator: Fruchtartendiversität) wurden folgende Analyse- und Bewertungsmethoden verwendet:

- Die Ackerbiotopwerte basieren auf für jede Fruchtart angepassten Biodiversitätsindizes. Eine wichtige Grundlage für die Bildung dieser Indizes sind bspw. Angaben zur Artenzahl der Segetalflora bei verschiedenen Anbauweisen. In der Simulation wurden jedoch keine unterschiedlichen Anbauweisen berücksichtigt, sondern nur ein Wert pro Fruchtart verwendet.
- Der Selbsternährungsgrad der Region Hannover wurde mit Hilfe eines neu entwickelten Modells (FoSuM) berechnet. Hierbei werden zunächst der Nahrungsmittelbedarf gemäß der empfohlenen täglichen Energieaufnahme pro Einwohner und die Nahrungsmittelbereitstellung (Indikator: GJ, berechnet aus den mittleren Erträgen der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Bodengüte und dem Energiegehalt der Fruchtarten pro Tonne Trockenmasse) für jede Gemeinde getrennt berechnet. Nach Abzug der für die Biogasproduktion be-

nötigten landwirtschaftlichen Flächen kann eine Nahrungsmittelbilanz für jede Gemeinde erstellt und für die Region aufsummiert werden, indem die Produktion dem Bedarf gegenübergestellt und in % angegeben wird. Diese Bilanz spiegelt den Selbstversorgergrad der Region wider.

- Die Fruchtartendiversität wurde mit dem Shannon-Index bestimmt. Dieser wurde als geeignet ausgewählt, da er sowohl die Kulturartenanteile als auch deren räumliche Verteilung berücksichtigt. Der Index wurde für zwei räumliche Bezugseinheiten (Gemeindeebene und der Fläche eines 2,5 km x 2,5 km Rasters) gerechnet, um regionale Unterschiede darstellen zu können.

Zur Bearbeitung der Forschungsfrage nach der Berücksichtigung von Skaleneffekten wurde ein neuer konzeptioneller Rahmen entwickelt, der die bestehenden Konzepte des DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact und Responses; EEA 1999) zur Analyse von Mensch-Umwelt-Beziehungen und der Skalenfrage nach Cash et al. (2006) verknüpft. Dieser Analyserahmen wurde dann in einer geschachtelten Fallstudie zu den Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf der lokalen und regionalen Ebene eingesetzt (s. Albert et al. 2014, 2016).

Abschließend werden mögliche Steuerungsinstrumente diskutiert und Empfehlungen für ihre Anwendung und Weiterentwicklung gegeben. Für Ergänzungen aus rechtlicher Sicht geht unser Dank an Herrn RA Dr. Frank Niederstadt.

3.5.4 Ergebnisse

3.5.4.1 Bewertung der Testbetriebe

Die nachfolgenden Ergebnisse werden in anonymisierter Form dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse der Umweltbewertung für die Testbetriebe A, B, C dargestellt. In abweichender Reihenfolge werden den Besitzern der Betriebe die Kürzel L1, L2 und L3 bei der Darstellung der Ergebnisse aus den Experteninterviews zugeordnet.

Bedeutung der Habitate für den Artenschutz und Empfindlichkeit gegenüber Energiepflanzenanbau und anderer landwirtschaftlicher Nutzung

Im Vergleich der Testbetriebe variiert die Empfindlichkeit, Vielfalt und Qualität von Lebensräumen und deren Verbundstrukturen stark. Auf Betrieb C wurden für den Schutz von Vögeln bedeutsame Bereiche mit hoher Empfindlichkeit identifiziert, in denen gleichzeitig ein weiträumig konzentrierter Maisanbau v.a. für die Energiegewinnung stattfindet. Eine sich daraus ergebende unzureichende Vielfalt an Habitaten und an Habitatqualitäten (u.a. fehlendes Nahrungsangebot, Mangel an geeigneten Deckungshabitaten) kann sich auf mittlere Sicht negativ auf das Vorkommen von Arten der Agrarlandschaft auswirken. Die hohe Beschattungsrate der Säume durch den hochwüchsigen Mais kann zudem im Status quo zu einem reduzierten Lebensraumangebot für lichtliebende Saumbewohner führen. Bezogen auf das Biotopentwicklungspotenzial (BEP) ergab eine Untersuchung mittels einer

Hofbodenkarte für den Betrieb B ein hohes BEP auf einigen Kalkäckern. Kalkacker-Biotope sind erheblich durch Flächen- und Qualitätsverluste bedroht (von Drachenfels 2012). Sie sind als Standorte für die Entwicklung seltener Ackerwildkrautfluren für den Naturschutz wertvoll (Hofmeister & Garve 2006). In erster Linie ist daher das BEP für den Landwirt ein Hinweis darauf, wo Maßnahmen der Biotopentwicklung die besten Aussichten auf Erfolg hätten.

Die sehr ertragreiche Region des Betriebes C ist in Teilen des Gebietes fast frei von Gehölzen. Dies ist u.a. der Bedeutung als Rübenanbauregion und den damit verbundenen Anbau-/Erntetechniken geschuldet, deren Ausführung durch Gehölzrandstrukturen behindert werden kann. Da artenarme Säume und Grünlandflächen kaum vorhanden sind, gibt es neben den Äckern so gut wie keine anderen Offenlandbiotope. Der Betrieb A weist zwar einige Grünlandflächen auf, allerdings sind diese – sofern sie nicht in den mit Auflagen versehenen Schutzgebieten liegen – sehr intensiv genutzt (z.T. sechsschürig). Diese Flächen weisen somit keine bedeutende Habitatqualität auf (vgl. Biotopwertstufen nach Bierhals et al. 2004). Die in den Landschaftsschutzgebieten gelegenen Flächen besitzen z.T. jedoch höhere Biotopwerte. Im Betrieb B sind die Lebensraumqualität und -vielfalt aufgrund des hohen Anteils kleinteiliger Strukturen im Vergleich zu den anderen Betrieben als relativ hoch einzustufen.

CO_2-Retentionsfunktion

Das CO_2-Retentionspotenzial bezieht sich auf die Kapzität von Acker- und Gründlandböden zur Retention von Kohlenstoffdioxid, also einer Vermeidung von Emissionen. Dieses Potenzial variierte auf den drei Testbetrieben in Abhängigkeit zu den vorhandenen Bodentypen und deren Nutzungsform zwischen 100 und 900 t CO_2 ha^{-1} (vgl. Saathoff et al. 2013). Durch ein hohes Vorkommen ackerbaulich genutzter Niedermoorböden (primäre Anbaukultur: Mais für die Biogasanlage) weist Betrieb C im Fall gleichbleibender Nutzung mit insgesamt 62 400 t potenziell emittierbarem CO_2 eine relativ hohe Emissionsrate auf. Im Betrieb A werden bei gleichbleibender Nutzung der Grünland- und Ackerflächen auf Niedermoor insgesamt ca. 16 200 t CO_2 emittiert. Andererseits trägt Betrieb A durch den Schutz seiner Grünlandflächen vor Umbruch und einen weitest gehenden Verzicht auf Grünlanderneuerungsmaßnahmen zu einer CO_2-Retention von insgesamt 18 060 t CO_2 bei. Dies liegt an dem vergleichsweise hohen Grünlandanteil unter Niedermoor, das im Vergleich zu den mineralischen Böden besonders hohe C-Vorräte pro ha aufweist. Das Risiko für CO_2-Emissionen bzw. das CO_2-Retentionspotenzial von Betrieb B konnte nicht geschätzt werden, da für die auf dem Betrieb vertretenen Bodentypen derzeit keine bekannten belastbaren Daten über mögliche CO_2-Emissionen im Falle von Grünlandumwandlung in Acker existieren (vgl. Saathoff et al. 2013). Die Qualität der Bewertungsergebnisse ist folglich stark abhängig von der vorhandenen schwachen Datenbasis. Des Weiteren variieren die Ergebnisse erheblich mit der Auflösung der Kartenbasis. Dies konnte für die Testbetriebe im Vergleich der CO_2-Bewertung mit Bodenkarten in den Auflö-

sungen 1:500.000, 1:25.000, 1:5000 und schließlich der noch differenzierteren Hofbodenkarte festgestellt werden.

Auf dem Betrieb C überlagern sich die empfindlichen Bereiche mit Bedeutung für den Artenschutz und Klimaschutz, da das stark klimarelevante Niedermoorgebiet ebenfalls als Bereich mit lokaler Bedeutung für Brutvögel ausgewiesen ist.

Direkte N_2O-Emissionen aus der Düngung

Die Ergebnisse des angewandten operationalisierten Modells zur Bewertung direkter N_2O-Emissionen aus der Düngung von Stickstoff (N) auf 24 Ackerschlägen des Betriebes B zeigen keine relevanten direkten N_2O-Emissionen. Sie variieren von 0,41 t CO_2-Äquivalent ha^{-1} a^{-1} für die durchwachsene Silphie (Düngung: 30 kg N ha^{-1} a^{-1}, Bodenart: sandiger Lehm) bis 1,1 t CO_2-Äquivalent ha^{-1} a^{-1} für die Zuckerrübe (Düngung: 150 kg N ha^{-1} a^{-1}, Bodenart: mittel sandiger Lehm). Eine im Vergleich dazu mit bis zu 12 t CO_2-Äquivalent ha^{-1} a^{-1} deutlich höhere Freisetzung klimaschädlicher Gase wird nach Berechnungen des N_2O-Tools auf den für N_2O-Ausgasung sensibelsten Standorten (grund- oder stauwasserbeeinflusst) aufgrund der hohen N-Düngung beim Zuckerrübenanbau selbst unter Einhaltung der guten fachlichen Praxis (GfP) freigesetzt. Andererseits konnten für die mineralischen, nicht grund- oder stauwasserbeeinflussten Böden aller untersuchten Testbetriebe keine markanten direkten N_2O-Emissionen berechnet werden. Daher konnte aus dem Ergebnis keine zwingende Relevanz für eine Schutzmaßnahmenempfehlung abgeleitet werden. Um jedoch auch die indirekten, düngebasierten N_2O-Emissionen zu berücksichtigen, wurden dennoch Maßnahmen definiert, die einen generellen Beitrag zur Reduktion solcher Emissionen leisten.

Die den Testlandwirten vorgeschlagenen Maßnahmen zur ökologischen Optimierung ihres Energiepflanzenanbaus lassen sich (in gekürzter Form) den nachfolgenden Ergebnissen der leitfadengestützten Experteninterviews entnehmen.

3.5.4.2 Motive und Kapazitäten der Maßnahmenumsetzung – Experteninterviews mit den Testlandwirten und ‚Discrete Choice Experiment' (DCE)

Ökonomische Beweggründe

Zusammengefasst lässt sich den Ergebnissen der Experteninterviews entnehmen, dass Landwirte sich in der Regel nur dann zu einem ökologisch optimierten Energiepflanzenanbau bereit erklären, wenn der Deckungsbeitrag dadurch nicht sinkt. Es wurden jedoch einige Ausnahmen genannt. Da diese unter den Voraussetzungen anderer (nichtökonomischer) Motive zustande kamen, sind sie diesen jeweiligen Beweggründen nachfolgend zugeordnet (s. „Soziale Beweggründe – Öffentlichkeitswirksamkeit" sowie „Sonstige Beweggründe – Hobby Jagd" und „- Landschaftsbild").

Die vorgeschlagene Maßnahme der Schaffung und Pflege von Gehölzstrukturen ist bei Landwirt 1 (L1) vor allem von ökonomischem Interesse. Er hegt und pflegt die ausgeprägten Gehölzstrukturen entlang seiner Flächen vor allem, weil sie Schatten für sein Vieh spenden. Bei L2 und L3 sind ökonomische Interessen hin-

gegen weniger ausschlaggebend für die Bereitschaft zur Gehölzanlage (s.u.). Auch den Grünlandschutz betreibe L1 nur aus ökonomischen Gründen, weil Umbrechen und Neuansäen oder Pestizideinsatz mit Direktsaat teurer seien als die Nachsaat im Schlitzverfahren. Klima- (s. ökologischer Maßnahmensinn) oder Artenschutzaspekte (s. räumliche Tragweite) spielen hier für ihn keine Rolle.

Die Maßnahme, den Anbau von Sommergetreide prozentual zu erhöhen, wird von allen Testlandwirten aus finanziellen Gründen abgelehnt, da die Deckungsbeiträge im Vergleich zu anderen Kulturarten zu gering ausfallen. Dies bestätigen auch die Landwirte des DCE. Allgemein wird Sommergetreide vor allem eine Rolle als Ausweichfrucht zugesprochen, wenn es zu frostbedingten Ausfällen im Wintergetreide kommt. Gegen das Stehenlassen der Maisstoppeln im Winter spricht für die meisten Landwirte das erhöhte Risiko des Zünsler-Befalls.

Als kostenneutrale Maßnahme wurde den Landwirten in den Experteninterviews die Abstimmung der Fruchtfolge zur Vermeidung großflächiger Konzentrationen einer bestimmten Kulturart (z.B. Mais im direkten Umkreis der Biogasanlage) vorgeschlagen. Die Absprache soll darauf abzielen, auf benachbarten Schlägen unterschiedliche Kulturarten anzubauen, um für den Artenschutz eine räumlich und zeitlich größere Habitatvielfalt und/oder verbesserte Habitatqualitäten durch Randeffekte zu schaffen. L3 hält diese Maßnahme nicht für kostenneutral und schließt sie aus, da der Absprachеaufwand finanziell nicht zu entschädigen ist. Er sieht aufgrund der kleinräumigen Strukturen in seiner Region jedoch auch ökologisch keine Notwendigkeit dafür. L2 lehnt diese Maßnahme vorerst ebenfalls ab, lenkt dann aber später ein, dass es evtl. eine Möglichkeit gäbe, einen runden Tisch mit Landwirten einzurichten, wenn alle eine Absprache als erforderlich sehen, um die Produktion aufrechtzuerhalten. Eine Absprache mit Feldnachbarn im umgekehrten Fall, zum Anbau gleicher Kulturen auf benachbarten Flächen aus logistischen Gründen, wird hingegen nicht als problematisch betrachtet. Diese Art der Fruchtfolgenabsprache wird bei L2 und L3 mit den Feldnachbarn bereits praktiziert.

Soziale Beweggründe

Beziehung zu anderen Landwirten: Anders als L2 und L3 betrachtet L1 die Maßnahme der Abstimmung der Fruchtfolge (s.o.) als umsetzbar (sofern man sie für erforderlich hält). Die Fruchtartenverteilung könne mit den Anbauern für die Biogasanlage abgestimmt werden, da ein gutes Gesprächsklima im Dorf vorherrsche.

Öffentlichkeitswirksamkeit: Eine Ausnahme hinsichtlich der Voraussetzung eines (zumindest) ausgeglichenen Deckungsbeitrags für die Maßnahmenbereitschaft wird durch das Motiv der sozialen Akzeptanz begründet. So nähme L2 z.B. teilweise auch etwas geringere Deckungsbeiträge in Kauf, wenn die verantwortliche Maßnahme einen Werbeeffekt für ihn hätte und zur Akzeptanzschaffung in der Gesellschaft führe. Für L1 und L3 war die öffentliche Meinung weniger ausschlaggebend für die Maßnahmenbereitschaft. Sie bauten hier eher auf Aufklärung über landwirtschaftliche Praktiken im Energiepflanzenanbau durch Hofführungen oder das

Aufstellen von Informationstafeln. L3 gab zudem zu bedenken, dass die Öffentlichkeit ihn zwar indirekt durch Steuergelder finanziere, aber ja nicht direkt über die Mittelvergabe entscheide. Er sei somit nicht unmittelbar von der Gunst der Bevölkerung abhängig.

Dennoch scheint die Öffentlichkeitswirksamkeit von Maßnahmen ein starkes Motiv für die Maßnahmenbereitschaft von Landwirten zu sein (häufig blieb jedoch unklar, an welche Deckungsbeitragsvoraussetzungen diese Bereitschaft geknüpft ist). So gaben fast alle Landwirte des DCE an, dass die soziale Akzeptanz des Energiepflanzenanbaus für sie der Hauptbeweggrund für die generelle Maßnahmenumsetzung sei[13]. Bevorzugt wurden allgemein daher eher Maßnahmen mit hohem Öffentlichkeitswert wie z.B. Blühstreifen. Bei der Anlage von Blühstreifen legten jedoch einige Landwirte großen Wert darauf, diese für die Biogasanlage mitbeernten zu dürfen. Den in den Experteninterviews vorgeschlagenen Maßnahmen wie dem stärkeren Anbau von Sommergetreide, dem Überwintern von Stoppeln sowie Ackerrandstreifen wurde keine große Öffentlichkeitswirkung zugesprochen. So gibt L2 an, er würde Ackerrandstreifen im Gegenteil zum Blühstreifen nicht aus Gründen der Akzeptanzschaffung umsetzen. Die Maßnahmen würden von der Bevölkerung meist nicht bemerkt. L3, für den die Öffentlichkeitswirksamkeit kein entscheidendes Maßnahmenkriterium zu sein schien (s.o.), wäre hingegen unter der Voraussetzung eines unverminderten Deckungsbeitrags zur Anlage eines Ackerrandstreifens z.B. in Mais oder Raps bereit.

Ökologische Beweggründe

Sinn ökologischer Maßnahmen: Hinsichtlich des verstärkten Anbaus von Sommergetreide gab L3 zudem zu bemerken, dass dies in Regionen, in denen bereits viel Mais angebaut würde, auch ökologisch nicht sinnvoll sei, da dies großräumig zu gleichen Bewirtschaftungsterminen und damit einem verringerten Habitatangebot führe. Ökologische Probleme bringe der Sommergetreideanbau laut L3 auch für den Wasserschutz in Wasserschutzgebieten mit sich, da hier die Flächen im Winter nicht bedeckt seien (Nitratauswaschungen). L1 gibt zudem den hohen Wasserverbrauch zu bedenken. Dies wird auch ökonomisch als problematisch eingestuft, da ein sehr hoher Bewässerungsaufwand vorherrsche. Das Stehenlassen der Stoppeln im Winter auf Maisschlägen ist laut L1 ökologisch nicht sinnvoll, da die späte Ernte ohnehin ein Aufkommen von Ackerwildkräutern nicht zulassen würde und der Winterhabitateffekt somit geschmälert sei. Stoppeln von Sommergetreide seien hingegen sinnvoller. Da der Anbau von Sommergetreide aber weder ökonomisch noch aus Akzeptanzgründen attraktiv zu sein scheint, wird auch der Maßnahme der Stoppelüberwinterung hier nur eine geringe Umsetzbarkeit eingeräumt.

[13] Diese generelle Maßnahmenbereitschaft ist unabhängig von den Auswirkungen der Maßnahme auf die Deckungsbeitragsentwicklung zu betrachten. Die Bereitschaft steht nicht automatisch im Zusammenhang mit der Hinnahme von Deckungsbeitragsverlusten. Wenn diese Bereitschaft vorlag, wurde im Text darauf hingewiesen.

L2 hält Ackerrandstreifen für eine effektive Artenschutzmaßnahme: Man könne mit relativ geringen Mitteln viel für die Artenvielfalt erreichen, wenn man den passenden Standort auswählt. Er würde einen Ackerrandstreifen allerdings nur anlegen, wenn der Deckungsbeitrag inklusive der aus der Maßnahme hervorgehenden Kosten für die Folgefrucht ausgeglichen würde (Folgen einer Aussamung der Kultur im Ackerrandstreifen in der Nachfrucht) oder aber wenn er den Ackerrandstreifen normal mit beernten darf[14]. Beim Zuckerrübenanbau[15] schloss er die Maßnahme aufgrund des Wildkrautdruckes jedoch kategorisch aus. L1 hält den Ackerrandstreifen ökologisch für sinnvoller als den Blühstreifen, weil ersterer überwintert, während der Blühstreifen erst im Mai gesät und im Sommer schon wieder vertrocknet ist und dann im Herbst geerntet wird.

Die mit dem Umbruch mineralischer sowie mit dem Erneuerungsumbruch organischer Böden (Moore) verbundenen CO_2-Emissionen (und somit die Maßnahme des Grünlandschutzes) schätzt L1 als nicht relevant für den Klimaschutz ein. Nach einem Grünlandumbruch (mineralische Böden) würden sich die C-Vorräte bei Grünlandneubegründung ja schließlich schon nach 20 Jahren wiederaufgebaut haben. Generell befindet er das Thema Klimaschutz in der Landwirtschaft viel zu hochgehängt. Viel wichtiger sei doch das Problem der Verbrennung fossiler Rohstoffe. Bei L1 und L3 war die Klimarelevanz von N_2O-Emissionen aus der Stickstoffdüngung unbekannt. L3 wusste daher auch nicht, mit welchen Maßnahmen er N_2O-Emissionen vermeiden bzw. reduzieren könnte. Allerdings dünge er schon sehr standortbewusst. Mit der Ausbringung des Klärschlammes per Schleppschlauch für die Anlagenzulieferer soll künftig – wenn auch aus anderen Motiven – auch bei L1 eine relevante Maßnahme zur Verminderung von N_2O erfolgen. Dies sei eine vertragliche Auflage für die Biogasanlage.

Räumliche Tragweite von Nutzungsauswirkungen: Die Information der Landwirte über Nutzungsauswirkungen, die über die Betriebsgrenzen hinausreichen, beeinflusste die beteiligten Landwirte in unterschiedlichem Maße. Für L3 spielte dieser Aspekt überhaupt keine Rolle, da Landwirte „Lokalpatrioten" seien. Eine Maßnahmenwirkung müsse räumlich noch abschätzbar sein. Dies sei bis zur regionalen Ebene noch der Fall, darüber hinaus werde es schwierig. L2 ließe sich bei größerer räumlicher Tragweite von ökologischen Problemen zu Maßnahmen überreden, wenn dies einen weiträumigen Werbeeffekt hätte (z.B. überregional darüber berichtet würde). Für L1 wäre der Schutz einer weiträumig bedrohten Art kein Grund z.B. Grünlandschutz zu betreiben.

Rechtliche Beweggründe

L1 wäre generell zur Anlage von Randstreifen bereit, wenn diese vernünftig bezahlt würden. Er setzt dabei jedoch voraus, dass die Gelder nicht aus solchen öffentlichen Mitteln stammen, die das Risiko der Cross-Complience-Kontrollen er-

[14] Die letzte Option gilt jedoch nicht für Niedermoorstandorte.

[15] Gilt für den Schlag nur in dem Jahr, in dem Zuckerrüben angebaut werden, in Folgejahren ist die Anlage eines Ackerrandstreifens theoretisch denkbar.

höhen. L3 sowie ein Landwirt aus dem DCE geben zu bedenken, dass Randstreifen für Betriebe mit hohen Pachtanteilen ein Risiko für die Existenz bedeuten könnten. Dies sei darauf zurückzuführen, dass die aus Ackerrand- oder Blühstreifen resultierende Wildkrautverbreitung bei manchen Verpächtern als unsachgemäße Flächenbewirtschaftung und somit als Pachtkündigungsgrund ausgelegt werden könnten.

Hinsichtlich des Schutzes von Dauergrünland betonten sowohl L1 als auch einige Landwirte des DCE, dass die CC-Regelung zum Schutz von Dauergrünland dazu geführt habe, dass viele Landwirte ihr Grünland vor Inkrafttreten der Regelung umgebrochen hätten bzw. jetzt immer noch im fünften Jahr der CC-Regelung umbrächen. Grund hierfür war, dass mit der Vergabe des Dauergrünland-Status nach dem fünften Grünlandjahr keine Selbstbestimmung über die Flächenbewirtschaftung mehr vorherrsche und man sich und seinen Kindern die Möglichkeit nähme, dort etwas anzubauen. Auch verlangten einige Verpächter von ihren Pächtern, den Ackerstatus zu erhalten, womit sie zum Umbruch gezwungen wären.

Sonstige Beweggründe

Hobby Jagd: Aufgrund ihrer Habitatfunktion für Wildtiere steht L3 Gehölzpflanzungen als Jäger generell offen gegenüber. Unter seiner Mitwirkung wurden in seiner Region in der Vergangenheit diverse Gehölzstrukturen in Eigeninitiative und auf eigene Kosten der Jägerschaft angelegt.

Selbstbestimmung: Ein wesentliches Motiv für die Eigenfinanzierung der zuvor genannten Gehölzanlagen von L3 war, dass die Jäger selbst über Ort, Art und Zeitpunkt von Anlage und Pflege der Strukturen entscheiden wollten. Insgesamt stehen aber die Landwirte, die an der Befragung und dem Choice-Experiment teilnahmen, weiteren Pflanzungen sowohl zur Habitatschaffung als auch zum Erosionsschutz v.a. aus dem Grund mangelnder Selbstbestimmungsmöglichkeiten bei Anlage und Pflege kritisch gegenüber. Als Hemmfaktor für weitere Pflanzungen gaben die Landwirte Auflagen beim Rückschnitt sowie diesbezügliche Beschwerden aus der Bevölkerung an. Bäume und Blühstreifen erschwerten laut L2 zudem das Überladen der Zuckerrüben. Dennoch schließen L2 und L3 weitere Pflanzungen nicht kategorisch aus.

Landschaftsbild: L2 hat in seiner Feldmark in Gemeinschaft mit benachbarten Landwirten in der Vergangenheit ebenfalls Gehölzstrukturen angelegt, wenngleich auch im wesentlich geringeren Ausmaße als L3 (s. Hobby Jagd). Die hierzu erforderlichen Materialkosten wurden dabei aus Fördermitteln bereitgestellt, der Arbeitseinsatz wurde den Landwirten hingegen nicht entgolten. Unter solchen Voraussetzungen wäre L2 auch künftig zu weiteren Pflanzungen bereit. Als maßgebliches Motiv für diese Bereitschaft nannte L2 die Aufwertung des Landschaftsbildes.

3.5.4.3 Bedeutung räumlich-genauer Umweltinformationen für die Maßnahmenentscheidung – ‚Discrete Choice Experiment' (DCE)

Im DCE wurden die sieben teilnehmenden Landwirte eingangs befragt, ob sie etwas an der ihnen vorliegenden Status-quo-Bewirtschaftungsvariante des virtuellen Betriebes ändern würden. Vier von sieben Landwirten behielten daraufhin die Kulturarten des Status quo bei. Drei Landwirte entschieden sich mit der Kulturartenvariante C (vgl. Tabelle 3-15) für eine höhere Kulturartendiversität. Kein Landwirt veränderte etwas an den für die Lebensraumqualität relevanten Parametern Hecken- oder Blühstreifenanteil. Nach der Umweltbewertung und den Maßnahmenvorschlägen (erhöhter Blühstreifen-, Hecken- und Kulturartenanteil zur Steigerung der Lebensraumvielfalt und der Lebensraumqualität) änderten nur zwei der sieben Landwirte etwas an der zuvor gewählten Kulturartenanzahl. Diese erhöhten den Kulturartenanteil von Alternative B auf C (vgl. Tabelle 3-15). Die nun folgende Information über die unterschiedlichen Kosten bewegte keinen Landwirt zur erneuten Änderung seiner zuletzt getroffenen Kulturartenwahl, obwohl Alternative B lt. Einsatz des Deckungsbeitrags-Rechners (siehe Kap. 3.3.3.4) einen insgesamt etwas höheren (ca. 600 €) Deckungsbeitrag ergab als Alternative C. Obwohl Alternative D den höchsten Deckungsbeitrag (ca. 6700 € höher als Alternative C) aufwies, entschied sich keiner der Landwirte für diese Anbauvariante. Den Heckenanteil erhöhten nach Bekanntgabe der Umweltinformation (steigende Lebensraumqualität mit steigendem Heckenanteil) nur zwei Landwirte. Da die vorgegebenen Hecken in der gesamten Feldmark verteilt waren und sich nicht nur auf die Flächengrenzen des fiktiven Betriebes beschränkten, wurden hierfür keine Pflanzkosten eingerechnet. Es wurde vorausgesetzt, dass hierfür Fördergelder zur Verfügung stehen, die Arbeit musste jedoch gemeinschaftlich von allen Landwirten der Feldmark übernommen werden. Mit dieser zusätzlichen Kosteninformation entschied sich ein weiterer Landwirt für die Erhöhung des Heckenanteils, alle anderen blieben bei ihrer vorherigen Entscheidung. Den Anteil der Blühstreifen erhöhten alle Landwirte nach Erhalt der Umweltinformation von 0 % im Status quo auf mindestens 1 % ihrer ackerbaulichen Fläche. Ein Landwirt erhöhte den Anteil auf 3 %, einer sogar auf 7 %. Letzterer änderte jedoch nach Information über die mit steigendem Blühstreifenanteil sinkenden Deckungsbeiträge den Anteil auf 3 %. Ein weiterer Landwirt erhöhte nach der Kosteninformation den Blühstreifenanteil von 1 auf 3 %. Ein Landwirt verwies darauf, dass er Blühstreifen auch ohne Umweltberatung anlegen würde, da er diese eher aus Image- als aus Naturschutzgründen etablieren würde. Die teilnehmenden Landwirte waren sich hierin weitestgehend einig.

Den einfachen Maisanbau auf durch Winderosion hoch gefährdeten Flächen (EfA 5, s. Tabelle 3-15) ersetzten alle Landwirte bereits im Status quo durch einen Maisanbau mit Untersaat. Nach Erhalt der Umweltbewertung änderten drei Landwirte die Bewirtschaftung. Ein Landwirt verringerte das Bodenabtragspotenzial weitest möglich durch Auswahl der für den Bodenschutz bestmöglichen Variante

E. Zwei Landwirte entschieden sich immerhin für die Anbauvariante D. Einer dieser beiden machte seine Entscheidung nach Erläuterung der Maßnahmen-/ Anbaualternativenkosten wieder rückgängig. Der im Vergleich zur Variante C entgangene berechnete Deckungsbeitrag der Anbaualternative D war diesem Landwirt mit insgesamt mind. 5000 € zu hoch. Fünf der sieben Landwirte wollten die im Status quo dargestellten Grünlandflächen in ihrem Zustand erhalten. Ein Landwirt wollte gleich zu Beginn alle Flächen in Acker umwandeln, da es hier häufig zu starken Schwarzwildschäden käme. Ein Landwirt entschied sich auf Basis der angegebenen Ackerzahlen für den Umbruch aller Gleyflächen. Die im Anschluss erläuterten Auswirkungen der gewählten Variante auf die CO_2-Entwicklung führten bei keinem Landwirt zu einer Meinungsänderung. Erst, nachdem die Deckungsbeiträge geschützter Grünlandflächen im Vergleich zu mit Mais bestellten Ackerflächen auf dem gleichen Standort bekannt gegeben wurden, entschloss sich ein Landwirt, der zuvor alle Grünlandflächen erhalten wollte, aus Kostengründen zum Umbruch der Gleyflächen (Variante G). Der Landwirt, der zuvor die Gleyflächen umbrechen wollte, entschied sich nun zum klimaschädlicheren Umbruch der Pseudogleyflächen, der ihm einen Deckungsbeitragsvorteil im Vergleich zum Umbruch auf Gleyböden von ca. 9000 € einbringt. Alle anderen Landwirte wollten trotz des Deckungsbeitragsverlustes alle Grünlandflächen beibehalten, da sie davon ausgingen, dass sie das Grünland zur Versorgung des Viehs auf ihrem fiktiven Betrieb nicht entbehren könnten und das Gras zudem auch für die Biogasanlage verwertet werden könne. Ein Landwirt, der sich zum Umbruch einiger Flächen entschlossen hatte, brachte das Gegenargument, dass das Vieh auch mit Grasuntersaat aus Getreide ernährt werden könne. Einige Landwirte brachen nicht um, da sie annahmen, dass der Standort nicht ackerfähig sei. Anderenfalls sei er schon längst umgebrochen worden. Zudem konnten einige die hypothetische Annahme, dass das Grünlandumbruchverbot nach Cross Compliance (CC) noch nicht gelte, nicht akzeptieren.

Das Risiko der Treibhausgasentstehung aus Landnutzung und Landnutzungsänderung war den Teilnehmern des DCE (wie auch in den Experteninterviews) kaum bekannt. Wie die flankierende Diskussion ergab, empfanden einige Landwirte das Thema zudem als wenig relevant, oder die vorgestellten Ergebnisse erschienen ihnen nicht glaubhaft.

3.5.5 Regionale Auswirkungen

3.5.5.1 Ergebnisse der Simulation der Fruchtartenverteilung für die unterschiedlichen Szenarien

Das Ergebnis der Simulation der räumlichen Fruchtartenverteilung im Jahr 2012 zeigt eine Konzentration von Mais im Norden und insbesondere Nordwesten der Region Hannover, bedingt durch den Bedarf an Mais als Futtermittel, die eher ungünstigen, sandigen Böden sowie die Biogasanlagenstandorte. Neben Mais do-

minieren im Norden Grünland und Roggenanbau (Abb. 3-27). Gerste und Winterraps werden im Vergleich zum Süden der Region deutlich häufiger angebaut. Weizen ist relativ selten. Auf den Geestplatten im Nordosten der Region spielt zusätzlich der Anbau von Kartoffeln eine große Rolle. In den Lössbörden im Süden Hannovers sind Weizen und Zuckerrüben die dominierenden Kulturen. Grünland kommt im Süden Hannovers fast nur in der Leineaue sowie am Deister-Höhenzug und dessen Ausläufern vor. Andere Kulturen spielen nur eine untergeordnete bis gar keine Rolle.

Im Biogasszenario steigt der Mais- und Energiemaisanteil an der Ackerfläche in der Region auf knapp 25 % bzw. 20 %. In den nördlichen Gemeinden Hannovers sind auch in diesem Szenario die Flächenanteile mit Energiemais an der gesamten Ackerfläche zum Teil deutlich höher. In der Stadt Garbsen im Nordwesten der Region Hannover steigt der Maisanteil an der Stadtfläche in diesem Szenario auf 74 %. Bei vier weiteren Gemeinden im Norden Hannovers und zweien im Süden der Region beträgt der Maisanteil zwischen 33 % und 44 %. Bei 15 Gemeinden nimmt der Maisanteil an der Gemeindefläche auch in diesem Szenario nur weniger als ein Drittel ein.

Im restriktiven Naturschutz-Szenario wurde der Maisanteil in jeder Gemeinde der Region Hannover auf maximal 15 % der Gemeindefläche gesteigert. Energiemais kann demnach lediglich auf 9 % der Gesamtackerfläche der Region angebaut werden. Die installierte Biogas-Leistung steigt dabei auf das 1,9-fache der Leistung im Jahr 2012. In diesem Szenario führt die Simulation der Fruchtartenverteilung nur zu marginalen Veränderungen im Norden der Region Hannover. Das liegt vor allem an weitläufigen erosionsgefährdeten Flächen und faunistischen Werträumen, aber auch an Trinkwasser- und Naturschutzgebieten. Zuwachs an Mais ist im Naturschutzszenario vor allem im Süden der Region zu verzeichnen. Die vorausgesetzten Steuerungsmechanismen führen zu einer gleichmäßigeren Verteilung des Maisanbaus über die Ackerflächen der Region.

Im konditionierten Naturschutzszenario steht etwas mehr Ackerfläche für den Maisanbau zur Biogasproduktion zur Verfügung. Dadurch steigen der Energiemaisanteil auf 11 % und der Gesamt-Maisanbau auf 16 % der Ackerfläche. Die durch Biogas erzeugte elektrische Leistung erhöht sich auf das 2,3-fache im Vergleich zur Situation im Jahr 2012. Auch in diesem Szenario konzentriert sich der Maiszuwachs auf den Süden und insbesondere den Süd-Osten der Region.

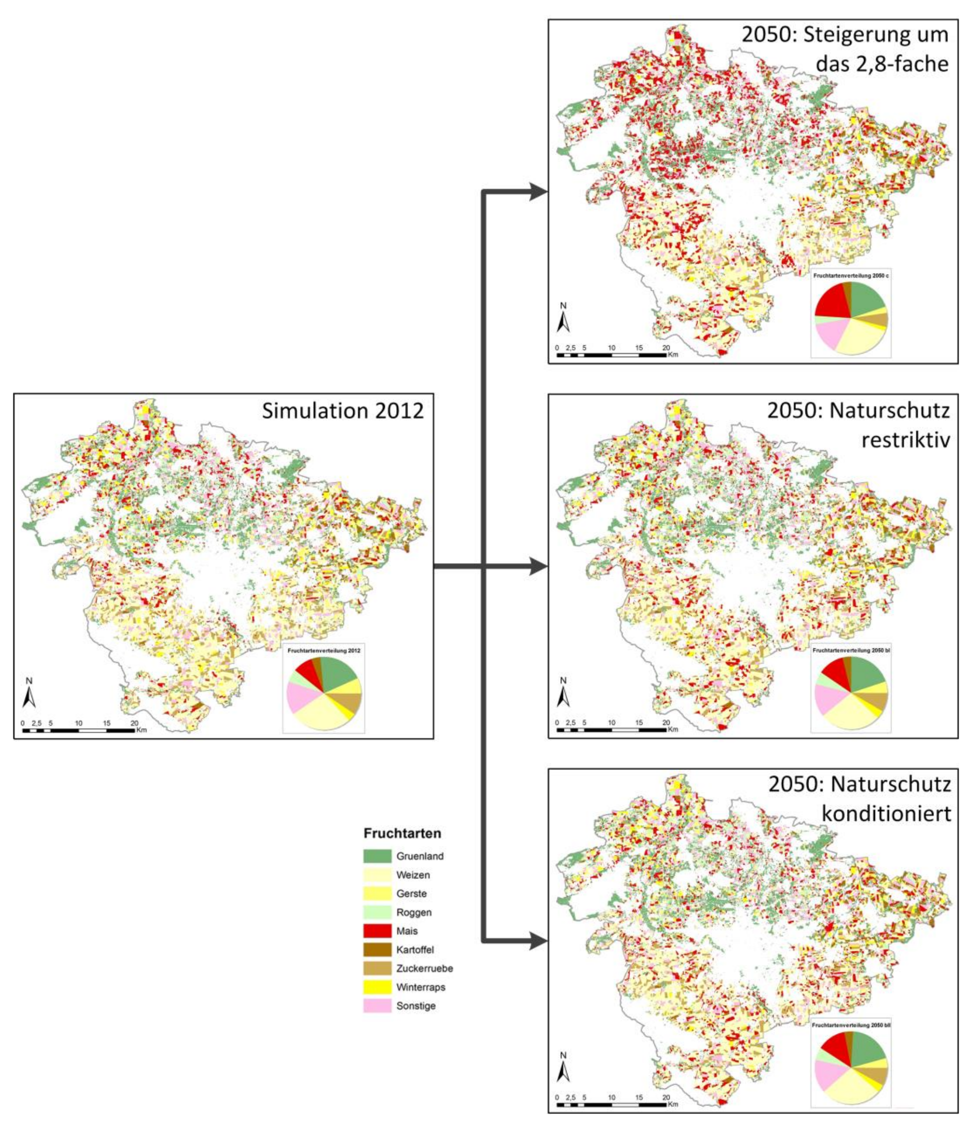


Abbildung 3-27: Ergebnis der räumlichen Simulation einer möglichen Verteilung von Mais und anderen Fruchtarten in den drei Szenarien „Biogas", „Naturschutz restriktiv" und „Naturschutz konditioniert"; Region Hannover

3.5.5.2 Potenzielle Auswirkungen der Szenarien auf Fruchtartendiversität, Nahrungsmittelbereitstellung und Ackerbiotopindizes

Die *Fruchtartendiversität* wird mit Bezug auf die Rasterzellen und die Gemeinden betrachtet. Die Auswertung der rasterbezogenen Analyse erfolgt im Hinblick auf den Anteil an Ackerflächen, die innerhalb von hoch bis sehr hoch (in Bezug auf

die Fruchtartendiversität) bewerteten Rasterzellen liegen. Die Bewertung der einzelnen Rasterzellen kann sich je nach Szenario ändern und damit auch der Anteil der Ackerflächen, die innerhalb der hoch und sehr hoch bewerteten Raster liegen. Im Ausgangsjahr 2012 liegen 72,2 % der Ackerflächen der Region Hannover innerhalb von Rasterzellen, deren Fruchtartendiversität als hoch bzw. sehr hoch bewertet wurden. Bei den Szenarien „Naturschutz konditioniert" und „Naturschutz restriktiv" steigt der Anteil der Ackerflächen, die innerhalb von hoch bzw. sehr hoch bewerteten Rasterzellen liegen, auf 72,6 % bzw. 72,8 %. Betrachtet man die Fruchtartendiversität je Gemeinde, so sind in beiden Naturschutzszenarien Steigerungen der Diversität in den Gemeinden Ronnenberg und Laatzen festzustellen. Im Biogasszenario zeigen sich lokal unterschiedliche Auswirkungen auf die Fruchtartendiversität. Insgesamt betrachtet sinkt der Anteil der Ackerflächen, die innerhalb von hoch bzw. sehr hoch bewerteten Rasterzellen liegen, deutlich von 72,2 % im Jahr 2012 auf jetzt 64,2 %. Im Hinblick auf die Fruchtartendiversität einzelner Gemeinden zeigt sich in Garbsen die stärkste Abnahme in der Fruchtartendiversitätsbewertung von „hoch" im Jahr 2012 auf „sehr gering" im Jahr 2050. Durchschnittlich sinkt die Fruchtartendiversität von Gemeinden im Westen der Region um eine Bewertungsstufe, während sich im Nordosten keine Änderungen auf Gemeindeebene ergeben, da hier der Maisanteil kaum gesteigert wurde.

Der *Selbstversorgungsgrad* der Region Hannover liegt nach allen Abzügen (Biogas & Veredelung) bei etwa 101% im Jahr 2012, bezogen auf die produzierten GJ im Vergleich zum Bedarf. Im restriktiven und im konditionierten Naturschutzszenario verringert sich dieser Wert auf etwa 96 bzw. 94 %. Die Region würde damit das theoretische Potenzial der Selbstversorgung aus landwirtschaftlichen Produkten knapp verlieren. Im Biogasszenario sinkt der Selbstversorgungsgrad auf 89 %.

Der Anteil der im Hinblick auf die *Ackerbiotopindizes* als naturschutzfachlich mittel bis sehr hoch bewerteten Flächen liegt im Jahr 2012 bei 19,2 %. Im Biogasszenario sinkt der Flächenanteil mit mittlerer bis sehr hoher Bewertung auf 10,1 %, wobei insbesondere Flächen mit sehr hoher Bewertung abnehmen.

Eine auf den ersten Blick überraschende Entwicklung zeigt sich im restriktiven und konditionierten Naturschutzszenario, bei denen die Anteile der sehr hoch bewerteten Flächen zwar annähernd konstant bleiben, die Flächenanteile mit mittlerer bis hoher Bewertung jedoch um circa 3 bzw. 4 % sinken. Diese Entwicklung liegt darin begründet, dass auch hier ein relativ großer Anteil von Flächen mit Anbau von Gerste oder Roggen in Mais mit schlechteren Ackerbiotopindizes umgewandelt wird.

Vergleich der Szenarien im Überblick

Im Vergleich der Szenarien zeigen sich *Wechselwirkungen (Trade-offs)* zwischen den einzelnen Ökosystemleistungen (s. Abb. 3-28). Die Steigerung des Biomasseanteils hat überwiegend negative Auswirkungen auf andere Ökosystemleistungen. Dies gilt insbesondere bei einer starken Steigerung des Maisanteils, wie es bei dem Biogasszenario der Fall ist. Eine Erhöhung des Biomasseanteils kann aber auch positi-

ve Auswirkungen haben, so steigt in beiden Naturschutzszenarien die Fruchtartendiversität auf die gesamte Region bezogen leicht an.

In der Region Hannover wird bisher im Vergleich mit anderen niedersächsischen Landkreisen nur in relativ kleinem Umfang Biomasse zur Produktion von Bioenergie bereitgestellt. Eine Steigerung des Bioenergiemaisanbaus hat damit weniger dramatische Auswirkungen als in anderen Regionen.

Insgesamt sind die Auswirkungen der beiden Naturschutzszenarien relativ gering im Vergleich zu größeren und stärker negativen Auswirkungen des extremen Anbauszenarios. Es zeigt sich damit, dass eine Lenkung des Biomasseanbaus in weniger empfindliche Bereiche stark positive Auswirkungen auf die Auswirkungen des Biomasseanbaus auf andere Ökosystemleistungen hat.

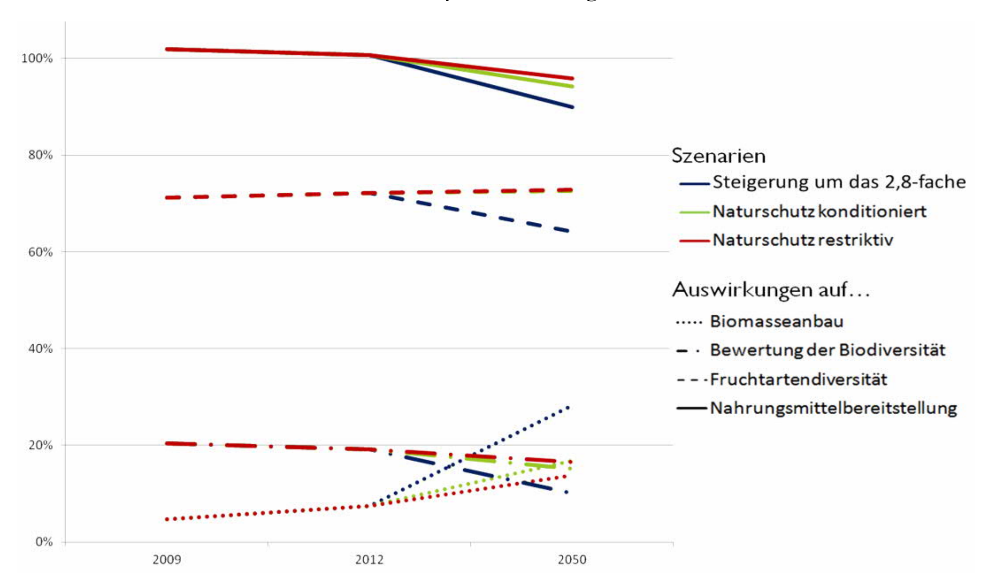


Abbildung 3-28: Wechselwirkungen (Trade-offs) zwischen dem Anbau von Biomasse und deren Auswirkungen in den Szenarien; Region Hannover

3.5.5.3 Umgang mit Skaleneffekten

Die exemplarische Analyse von Skaleneffekten des Biomasseanbaus und möglichen Steuerungsmöglichkeiten (Saathoff et al. 2013; Albert et al. 2014, 2016) kommt zu folgenden Ergebnissen: Viele Auswirkungen des Anbaus von Bioenergiemais auf andere Ökosystemleistungen betreffen Gebiete und Entscheidungsebenen oberhalb derjenigen, auf der die Entscheidungen zum Anbau von Bioenergie getroffen werden. Diese übergreifenden Auswirkungen können drei Typen zugeordnet werden:

Prozess-bezogene Auswirkungen entstehen durch ökologische Zusammenhänge, die nicht an bestimmten administrativen Grenzen enden. So überschneiden beispielsweise die Einzugsbereiche von Biogasanlagen, innerhalb derer Auswirkungen auf

die Fruchtartenverteilung zu erwarten sind, oftmals die Gemeindegrenzen, innerhalb derer über die Genehmigung der Biogasanlage entschieden wurde.

Wert-bezogene Auswirkungen finden statt, wenn durch Bioenergiepflanzenanbau andere Ökosystemleistungen beeinträchtigt werden, die auf höheren Entscheidungsebenen von Bedeutung sind. So können Veränderungen von Landschaftsstrukturen auf Betriebsebene zu einem Lebensraumverlust von Arten führen, die nach europäischem Recht geschützt sind.

Als dritter Typ können *summative (Space-crowing) Auswirkungen* genannt werden, die dann entstehen, wenn durch das Zusammenspiel mehrerer Prozesse oder durch viele Einzeleinflüsse in einem bestimmten Gebiet ein Schwellenwert überschritten wird, den das Ökosystem nicht mehr abfedern kann. Ein anderes Beispiel sind die im Einzelfall marginalen THG-Emissionen durch Landnutzung, die allerdings in der globalen Summation zu Klimaeffekten führen.

Ein möglicher Ansatzpunkt, um solche skalenübergreifenden Auswirkungen des Anbaus von Bioenergiepflanzen zu lösen, ist das Konzept des ‚Multilevel Governance' (Mehrebensteuerung). ‚Multilevel Governance' beschreibt das Zusammenspiel von staatlichen und nichtstaatlichen Akteuren über verschiedene Entscheidungsebenen und administrative Grenzen hinweg (für Details, siehe Albert et al. 2014, 2016).

Eine räumliche Analyse der Auswirkungen von Bioenergiepflanzenanbau auf benachbarte Regionen und höhere Entscheidungsebenen kann dabei helfen, passgenaue Systeme für Multilevel Governance zu entwickeln und praktisch umzusetzen. Die Analyse der Skalenrelevanz der Bioenergieauswirkungen in der Region Hannover und der Vergleich mit der tatsächlich umgesetzten Steuerung auf der regionalen Ebene zeigen, wie eine solche Analyse methodisch durchgeführt werden kann. Im Ergebnis können nutzbare Hinweise für eine Mehrebenensteuerung (*Multilevel Governance*) gewonnen werden. Eine Analyse der in der Region Hannover eingesetzten Steuerungsinstrumente für eine umweltfreundliche Gestaltung der Bioenergieproduktion ergab allerdings, dass viele Probleme nicht auf der theoretisch optimalen Ebene behandelt werden. Dieses könnte ein Anlass für die Verwaltung sein zu prüfen, ob dennoch die Steuerungsziele erreicht werden. In der Vergangenheit aufgetretene sowie gemäß den Szenarien mögliche Probleme betreffen insbesondere den Grünlandumbruch sowie die Fruchtfolgengestaltung (lokale Konzentrationen von hohen Maisanteilen). Dabei muss man dem Energiepflanzenanbau zugestehen, dass teils ohnehin stattfindende Veränderungen lediglich verschärft wurden. Ferner traten die genannten Probleme durch die Geschwindigkeit der Veränderungen sehr viel dramatischer hervor als im Falle des schleichenden Wandels der Landwirtschaft insgesamt in den vergangenen Jahrzehnten.

3.5.6 Diskussion

Die Ergebnisse des Vorhabens haben bestätigt, dass Lösungen für einen umweltschonenden Biomasseanbau auf unterschiedlichen Entscheidungsebenen ansetzen müssen. Zur Unterstützung einer Mehrebenen-Governance ist es sehr hilfreich, die ökologischen Auswirkungen den unterschiedlichen räumlichen Skalen- und damit Entscheidungsebenen zuzuordnen und dieses mit einer Analyse der derzeitigen Steuerungsansätze und räumlichen Problemlösung zu vergleichen.

Auf der Betriebsebene erfüllten die dort eingesetzten Methoden den Anspruch, automatisiert und damit einfach durchführbar zu sein sowie gleichzeitig das hohe Datenpotenzial dieser Ebene zu nutzen. Allerdings fehlt es für Einzelaspekte der standardisierten Modellierung von Auswirkungen noch an Grundlagenwissen. Bestätigt hat sich, dass Landwirte in engen ökonomischen Grenzen und abhängig von individuellen Präferenzen sowie betrieblichen Bedingungen bereit sind, Umweltanpassungsmaßnahmen durchzuführen. Viele Maßnahmen für eine nachhaltige Bioenergieproduktion sind nur sinnvoll an der Quelle, d.h. auf der Betriebsebene, anzusetzen. Dabei geht es vor allem um die Veränderung von Fruchtarten und Fruchtfolgen sowie um die Pflege, Erhaltung und Ergänzung von Kleinstrukturen. Als besonders günstig für viele Ökosystemleistungen (ÖSL) hat sich der Anbau mehrjähriger Energiepflanzen erwiesen (s. Kap. 3.3.2; Lamersdorf & Schulte-Bisping 2010: 14; Rode 2016). Die Landwirte hingegen bevorzugen für freiwillige Maßnahmen eher Blühstreifen oder in Einzelfällen die Anlage von kleineren Biotopstrukturen wie Hecken und Feldgehölzen.

Ein besonders wichtiges Motiv der Landwirte für die Durchführung von Umweltmaßnahmen war deren Öffentlichkeitswirksamkeit. Diesem Ziel entsprechen die o.g. Maßnahmentypen. Ferner scheint eine hohe Selbstbestimmung über die Maßnahmenwahl und -lokalisierung die Maßnahmenbereitschaft der Landwirte zu befördern. Die vielen Umweltargumente, die von den Landwirten angeführt wurden, zeigen, dass die Landwirte sich dieses Umweltmanagement auch zutrauen – zumindest wenn für sie keine ökonomischen Nachteile damit verbunden sind. Auf Betriebsebene sollten in der Konsequenz Umweltdaten, Umweltbewertungen und Maßnahmenvorschläge sowie Kostenberechnungen bereitgestellt werden, die die Landwirte bei der anspruchsvollen Aufgabe eines auf Fakten basierenden, bedarfsorientierten Umweltmanagements unterstützen können.

Auf der Regionsebene hat sich gezeigt, dass zum einen mit Szenarien sehr gut die Auswirkungen verschiedener Entwicklungsstrategien veranschaulicht werden können. Dabei neben der Biodiversität und dem Klimaschutz auch die ÖSL-Nahrungsmittelproduktion einzubeziehen, hat die Glaubwürdigkeit der Darstellung gegenüber den Akteuren der Landwirtschaft erhöht. Es fehlen allerdings für eine umfassende Beurteilung der Strategien noch weitere ÖSL sowie die Einbeziehung der Potenziale anderer erneuerbarer Energieträger. Die Ergebnisse der vorgelegten Szenarien werden ferner durch Datendefizite insbesondere bei raumkonkreten Informationen zur landwirtschaftlichen Nutzung eingeschränkt. Diese Proble-

me stellen aber nicht das Ergebnis in Frage, dass auf der regionalen Ebene sowie höheren Ebenen ein Steuerungsbedarf besteht, der derzeit nicht umgesetzt, sondern indirekt auf die Betriebsebene delegiert wird, ohne dass diese darauf vorbereitet wäre. Der Grund hierfür liegt darin, dass auf der regionalen und kommunalen Entscheidungsebene Steuerungskapazitäten und -instrumente im Bereich der Bioenergieproduktion fehlen bzw. dass vorhandene Instrumente nicht in dem notwendigen Maße eingesetzt werden können.

3.5.6.1 Diskussion der Folgenbewertung und Maßnahmenableitung mit MANUELA

Insgesamt erzeugen die neuen Bewertungswerkzeuge in MANUELA Ergebnisse, die dem Stand des Wissens entsprechen. Dennoch ist auf Grenzen der Gültigkeit hinzuweisen, die vor allem darauf beruhen, dass die Anzahl belastbarer Ergebnisse zu Auswirkungen landwirtschaftlicher Einzelpraktiken auf die Artenvielfalt noch sehr begrenzt ist, während das Wissen um die Wirkungen von Anbauweisen oder die Fruchtartendiversität besser zu sein scheint. Untersuchungsergebnisse zur Wirkung z.B. von Düngung und PSM-Einsatz beziehen sich zumeist auf einzelne bestimmte Arten und lassen sich nur schwer verallgemeinern (Reich et al. 2011). Grenzt man die Suche auf Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus ein, lassen sich kaum mehr belastbare und operationalisierbare Ergebnisse finden. Die im Artenschutztool implementierte Gewichtung von Auswirkungen bestimmter Bewirtschaftungsmethoden auf die Artenvielfalt basiert daher neben Daten aus der Literatur auch auf eigenen Einschätzungen.

Ein Mangel an belastbaren Daten ist darüber hinaus zu Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf die Biotopverbundqualität zu verzeichnen. Ein möglicher Einfluss könnte aufgrund der überdurchschnittlichen Wuchshöhe von Energiepflanzen in der Beschattung von (insbesondere) Offenlandbiotopstrukturen und damit einer beeinträchtigten Nutzbarkeit z.B. von Rainen als Biotopverbundkorridor oder Trittstein (Jedicke 1990) für lichtliebende Arten bestehen. Ob beispielsweise weiträumige Maisareale (z.B. im engeren Umkreis um die Anlage; s. Wiehe et al. 2010a,b) die Biotopverbundqualität lichtliebender Arten wie z.B. Heuschrecken und Tagfalter einschränken, lässt sich jedoch nicht anhand von vorhandenen, publizierten Forschungsergebnissen belegen, sondern nur logisch schlussfolgern (s. Saathoff et al. 2013). Hier besteht noch Forschungsbedarf. Mit vorliegenden Ergebnissen könnten dann auch Werkzeuge zur Bewertung entsprechender Einflüsse in MANUELA implementiert werden.

Die für den Einsatz in MANUELA entwickelten und angepassten Werkzeuge zur Bewertung von THG-Emissionen erlauben es, das Risiko für CO_2-Emissionen aus der Umwandlung von Grünland in Acker oder der landwirtschaftlichen Moornutzung sowie N_2O-Emissionen aus der Stickstoffdüngung im Energiepflanzenanbau abzuschätzen. Damit lässt sich die Klimarelevanz zweier wesentlicher Wirkfaktoren des Energiepflanzenanbaus - a) des vermehrten Grünlandumbruchs

(Nitsch et al. 2009, 2010) und b) von veränderten N-Einträgen aufgrund Änderungen der Fruchtarten und Fruchtfolgen sowie durch eine veränderte Düngung von Kulturen (Wiehe et al. 2010a) – auf der Betriebsebene räumlich differenziert abbilden. Die Aussagekraft hinsichtlich des CO_2-Emissionsrisikos erhöht sich dabei erwartungsgemäß mit der Auflösung der verwendeten Datenbasis für die Hauptbewertungsparameter, dem Bodentyp, wie ein Vergleich zwischen BÜK 50 und Hofbodenkarte zeigte. Eine genauere Abbildung des CO_2-Emissionsrisikos bleibt für die Praxis daher solange eine Herausforderung, bis entsprechendes Kartenmaterial in hinreichender Auflösung auch für Landwirte zu erschwinglichen Preisen erhältlich ist. Bislang stehen diese aufwändig erhobenen Daten in Niedersachsen den Landwirten leider nur zu erheblichen Kosten zur Verfügung. Ein weiteres Datenproblem besteht darin, dass für den Bewertungsparameter der CO_2-Emissionen aus dem Umbruch mineralischer Grünlandböden (C-Vorratsunterschiede nach Bodentypen; s. Saathoff et al. 2013) einigermaßen belastbare Daten nur für wenige Bodentypen existieren. Bis belastbare Daten vorliegen und veröffentlicht werden, unterliegt die genauere und flächendeckende Risikoabschätzung jedoch besagten Einschränkungen.

Die in den Testbetrieben festgestellten relativ geringen Emissionen und damit die auffallend gute Bewertung durch das N_2O-Tool in MANUELA sind vor allem auf die klimatischen Bedingungen der untersuchten Regionen zurückzuführen. Diese sind in dem verwendeten Modell stark ausschlaggebend für die Höhe düngebedingter N_2O-Emissionen. Höchste Emissionen werden in Gebieten mit intensiven Frostperioden und hohen Niederschlägen freigesetzt werden (Flessa 2010). Die Testbetriebe befinden sich jedoch in Regionen, in denen dies nicht der Fall ist. Allerdings sollte bei diesem Ergebnis berücksichtigt werden, dass sich die Gesamtmenge aus Düngeprozessen freisetzbarer N_2O-Emissionen sowohl aus direkten als auch aus indirekten Emissionen zusammensetzt. Die indirekten N_2O-Emissionen stammen aus atmosphärischer Deposition, Auswaschungen und Oberflächenabfluss von N-Verbindungen verschiedener Quellen (z.B. UBA 2006). Der genaue Anteil einer Quelle lässt sich hier nur grob schätzen, weshalb in der Praxis für die Bewertung indirekter N_2O-Emissionen noch häufig auf pauschale, räumlich nicht differenzierte Emissionsfaktoren (z.B. IPCC 1996) oder aber auf hochkomplexe Modelle zurückgegriffen wird, die für Landwirte und Berater kaum zu bedienen sind. Für eine vollständige Bewertung der N_2O-Emissionen sollten daher in Zukunft neben den in MANUELA abgebildeten direkten Emissionen auch die indirekten N_2O-Emissionen aus der Düngung standortspezifisch zugeordnet werden. Für Landwirte und Berater anwendbare, praktikable Modelle müssen hierzu jedoch noch entwickelt werden.

3.5.6.2 Ergebnisse der Experteninterviews und des DCE

Die Auswertungsergebnisse über die Motive und Kapazitäten der Landwirte, ihren Energiepflanzenanbau an die Bedürfnisse des Arten-, Klima- und Erosionsschutzes anzupassen, zeigten eine starke Abhängigkeit von der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen. Die Landwirte waren überwiegend nur unter der Bedingung eines gleichbleibenden oder gar höher erwirtschafteten Deckungsbeitrages zu einer ökologischen Optimierung bereit. Dies deckt sich mit der Beobachtung von Pannell et al. (2006), dass Landwirte vor allem dann zur Umsetzung von Schutzmaßnahmen bereit sind, wenn sich daraus finanzielle Vorteile für sie ergeben. Die Maßnahmenentscheidung der Befragten wurde jedoch nicht ausschließlich durch finanzielle Motive dominiert. So zeigte sich im DCE zudem, dass Maßnahmen vor allem dann angewendet wurden, wenn sie dazu beitrugen, die für mögliche negative Auswirkungen (insbesondere im Kontext verstärkten Maisanbaus) des Energiepflanzenanbaus zunehmend sensibilisierte Bevölkerung zu beschwichtigen. Da Konflikte mit der Bevölkerung in der Vergangenheit vor allem auf eine befürchtete Beeinträchtigung des Landschaftsbildes zurückzuführen waren (Wiehe et al. 2009), bevorzugten Landwirte überwiegend visuell wirksame Maßnahmen wie Blühstreifen. Für wenige Landwirte war die Öffentlichkeitswirksamkeit dabei sogar ein Grund, geringe Deckungsbeitragsverluste bei einer Maßnahmenumsetzung zu akzeptieren. Bestätigt wird dieses auch durch die zurzeit in vielen Regionen Niedersachsens von den Landwirten ohne Förderprogramme angelegten Blühstreifen (z.B. Initiative Bunte Felder im LK ROW).

Für die Planungspraxis ist die Frage, ob eine Maßnahmenbereitschaft auf rein finanziellem Interesse basiert oder aber auch durch andere Motive geleitet werden kann, hoch relevant. Die Ergebnisse des Vorhabens bestätigen die These, dass ein nachhaltiger Energiepflanzenanbau nicht nur durch finanzielle Anreize und Restriktionen, sondern zumindest teilweise auch durch Informationen und eigene Motive der Akteure erreicht werden kann. Während Landwirte mit multiplen Motiven sich evtl. auch durch weiche Instrumente wie Aufklärung und Beratung zu Schutzmaßnahmen bewegen lassen, die mit geringen ökonomischen Verlusten verbunden sein könnten, bedarf es bei ausschließlich betriebswirtschaftlich und hier ggf. kurzfristig ausgerichteten Landwirten eher finanzieller Anreize und/oder Restriktionen. Nur ein Landwirt erwähnte als Motiv für die Hinnahme gewisser Deckungsbeitragsverluste, dass die Landwirtschaft gesellschaftlich durch die GAP unterstützt würde und sich daher gesellschaftlich erwünschten Leistungen nicht verschließen sollte.

Die von der Mehrzahl der Landwirte v.a. aus mangelnder Öffentlichkeitswirksamkeit abgelehnten Maßnahmen wie Ackerrandstreifen oder späte Stoppelbearbeitung sind nur schwer zu ersetzende Maßnahmen, um seltene Ackerwildkräuter wieder zu fördern und langfristig zu schützen (z.B. Fuchs & Stein-Bachinger 2008; van Elsen & Daniel 2000; Hofmeister & Garve 2006). Für die Planungspraxis bedeutet dies, dass wichtige Bereiche des Naturschutzes, deren Schutzmaßnahmen

für Landwirte wenig attraktiv sind und die sie aus eigenem Interesse weder beantragen noch gar unentgeltlich umsetzen, besonderer Steuerung bedürfen. Das Subsidiaritätsprinzip wird hier kaum greifen. Zwar bieten auch andere Motive wie das Jagdinteresse vieler Landwirte generell Potenzial für naturschutzfachliche Maßnahmen wie Rand- und Blühstreifen (Wix et al. 2017). So werden vor dem Hintergrund vermehrt auftretender Wildschweinschäden in ausgedehnten Maisanbaugebieten Bejagungs- oder Schussstreifen in und an den Energiepflanzenfeldern empfohlen (z.B. Lißmann 2013). Um jedoch weitere Vorteile aus dieser Maßnahme zu schöpfen (erntefähige Produkte z.B. für die Biogasanlage, Öffentlichkeitswirksamkeit), werden diese Streifen in der Praxis häufiger in Form von gedüngten Kulturpflanzenstreifen oder dicht wachsenden, unkrautunterdrückenden Formen von Blühstreifen angelegt. Würden diese Streifen nicht mit Düngemitteln und Pestiziden behandelt und in einer lückigen statt ertragsorientierten Struktur angelegt, könnten seltene Arten der Ackerlebensgemeinschaften hierbei gleichzeitig mit gefördert werden (Wix et al. 2017). Dies müsste jedoch in der Beratung propagiert und evtl. in Förderbestimmungen entsprechend definiert werden.

Auch andere Maßnahmen mit positiven Effekten für den Artenschutz, wie die Anpflanzung von Gehölzstrukturen, sind vor allem auf das jagdliche Eigeninteresse vieler Landwirte zurückzuführen. Für die naturschutzfachliche Planung stellt die Jägerschaft daher einen zunehmend wichtigen Kooperationspartner dar. Hier sollten der Dialog und mögliche Kooperationen gesucht werden, um eine naturschutzgerechte Ausgestaltung der durch die Jägerschaft geförderten Maßnahmen wie die Anlage von Jagdschutzstreifen, nicht geernteter Blühstreifen, Säumen oder Gehölzstrukturen sowie deren Pflege zu begünstigen. Eine Herausforderung, der sich der Naturschutz dabei stellen muss, ist die in den Interviews erkennbare Abneigung der Landwirte, mit dem Naturschutz zu kooperieren. Sie suchen sogar bewusst andere Kooperationspartner wie die Jägerschaft, um die Fremdbestimmung über Art und Weise der Anlage und Pflege von Landschaftselementen (v.a. Hecken) zu umgehen. Auflagen und Bürgerbeschwerden bei der Heckenpflege wurden als Hauptbeweggrund für Abneigungen gegen die Anlage von Gehölzstrukturen genannt.

Neben der generellen Bereitschaft von Landwirten gilt es zu beachten, welche ökonomischen Kapazitäten Landwirte haben, anderen als kurzfristig finanziellen Zielen nachzugehen. Laut Aussage einiger Landwirte befinden sie sich im Existenzminimum und hätten keinen finanziellen Spielraum für ökonomisch nicht rentable Maßnahmen. Da sich der finanzielle Spielraum je nach Betriebsstruktur und Ertragsfähigkeit der Region stark unterscheidet, kann die Frage nach einer generellen eigenverantwortlichen Kapazität, Umweltleistungen zu erbringen, nicht pauschal beantwortet werden. Allerdings kann der finanzielle Spielraum für Maßnahmen beträchtlich erhöht werden, wenn Maßnahmenstandorte gewählt werden, auf denen eine Bewirtschaftung standortbedingt wenig rentabel ist und Ausgleichszahlungen auch betriebswirtschaftlich attraktiv sein können (z.B. durch Teilnahme

an Agrarumweltprogrammen). Dies wurde auch durch die befragten Landwirte bestätigt.

Um die ökonomischen Kapazitäten von Landwirten zu berücksichtigen, wurde den Landwirten in den Experteninterviews die als kostenneutral vermutete Maßnahme der Fruchtfolgenabsprache vorgeschlagen (s.o.). Auch wenn einer von drei Testbetriebs-Landwirten diese Maßnahme als unpraktikabel und unbezahlbar ablehnt, scheint sie generell doch umsetzbar zu sein. Dass Absprachen bereits unter dem gegenläufigen Ziel der flächenhaften Kulturartenbündelung praktiziert werden und zwei Landwirte sie generell für praktikabel halten, sofern man diese Maßnahme als notwendig erachtet, lässt auf ein gewisses Potenzial schließen. Der Vorschlag eines Landwirts, diese Maßnahme über Vereinbarungen der Biogasanlagengemeinschaft mit ihren Zulieferern zu regeln, ist vielversprechend und sollte geprüft werden. Für die Planung wäre dies eine kostengünstige, effektive Maßnahme zur Erhöhung der Habitatvielfalt durch die Schaffung von Randstrukturen, die sich ggf. auch gemäß dem Subsidiaritätsprinzip von der Betriebsebene (hier Biogasanlagengemeinschaft) initiieren ließe.

Die Umsetzung naturschutzfachlicher Maßnahmen hängt stark von den regionalen Anbaubedingungen ab. Dies zeigte sich insbesondere anhand des Maßnahmenvorschlages, den immer stärker schrumpfenden Anteil von Sommergetreide auf 10–30% zu erhöhen, um ein im Jahresverlauf möglichst langanhaltendes und diverses Angebot an Deckungs- und Nahrungshabitaten für die Fauna zu bieten (Fuchs & Stein-Bachinger 2008; Schertler & Bielau 2010). In bestimmten Regionen ist dies weder aus ökologischer noch aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll.

Eine weitere zentrale Forschungsfrage war, ob eine standortspezifizierte visuelle Darstellung möglicher negativer Bewirtschaftungsfolgen, aber auch positiver Maßnahmenpotenziale sowie deren Kosten die Bereitschaft zu einer entsprechenden Maßnahmenumsetzung von Landwirten beeinflussen kann. Im Experiment bewirkten die zusätzlichen Informationen (Status quo > Umweltbewertung > Kosteninformation) zwar in Einzelaspekten merkliche, aber nur bei Einzelpersonen stärkere Veränderungen hin zu einer gesteigerten Maßnahmenbereitschaft. Dies lässt sich auch darauf zurückführen, dass die teilnehmenden Landwirte zum Teil bereits auf Wissen über Naturschutzmaßnahmen aus eigener Erfahrung zurückgreifen konnten. Viele waren von Beginn an bei einigen Bewirtschaftungsaspekten in hohem Maße bereit, ökologische Anpassungsmaßnahmen durchzuführen. Besonders deutlich wird dies bei der Auswahl der Kulturartenverteilung, die von Beginn an bereits relativ positiv gesehen wurde (vier Kulturarten, Variante B oder gar die noch bessere Variante C; vgl. Tabelle 3-15). Die Kostenbewertung wiederum hatte keinen Einfluss auf die Entscheidungen der Landwirte. Das Ergebnis zeigt, dass die Mehrzahl der Teilnehmer mit 6 Fruchtarten in Variante C eine insgesamt auffällig diverse Fruchtartenverteilung präferierten. Nach einer Umfrage von Karpenstein-Machan & Weber (2010) liegt die durchschnittliche Kulturartenanzahl bei niedersächsischen Energiepflanzenanbauern (n=62) bei nur 4 Kulturarten. Die Mehrzahl der Testlandwirte repräsentiert also eine besonders aufgeklärte

Gruppe von Landwirten. Bemerkenswert ist dabei jedoch, dass die Best-Practice-Variante D von keinem Landwirt präferiert wurde, obwohl sie nach dem Kostenmodell die höchsten Deckungsbeiträge erzielte. Diesem Ergebnis misstrauten aber viele Landwirte, wie sich in den das Experiment flankierenden Gesprächen herausstellte.

Auch die Informationsvermittlung zu Hecken, Winderosion und CO_2-Emissionen durch Grünlandumbruch ergab keine besonders auffälligen Veränderungen in der Alternativenauswahl. Die einzig signifikante Veränderung trat bei der Auswahl der Blühstreifenanteile zu Tage. Diese änderte sich von 0% Blühstreifenanteil bei allen Befragten im Status quo überwiegend zu einem 1%-igen Anteil. Dies wurde jedoch dadurch begründet, dass sie Blühstreifen nicht für optional gehalten hatten, und kann somit nicht als Hinweis auf den Informationswert interpretiert werden. Über die Bedeutung schlaggenauer kartographischer Umwelt- und Kosteninformation für die Maßnahmenbereitschaft konnte im DCE folglich leider weniger herausgefunden werden. Der Wert der Ergebnisse des DCE liegt jedoch wie bei den Experteninterviews vielmehr in den Motiven der Landwirte, Maßnahmen überhaupt umzusetzen.

Die für die Untersuchung gewählten Methoden haben sich als geeignet erwiesen, um eine Vielzahl von Erkenntnissen über die Motive und das Entscheidungsverhalten der Landwirte zu erzeugen. Die in qualitativen Interviews verwendete offene Frageform ist eher als quantitative Befragungsformen in der Lage, das Erzählverhalten der Befragten zu fördern und dabei mehr über (in diesem Fall) Ursachen und Gründe für gewählte Bewirtschaftungsmethoden zu erfahren. Quantitative Befragungsformen verwenden zumeist geschlossene Fragen, die wenig auf den Befragten einzugehen vermögen. Wichtige Informationen über Motive und Kapazitäten für die Bereitschaft, ihren Energiepflanzenanbau anzupassen, würden somit verloren gehen. Das wurde sowohl im Zuge der Experteninterviews als auch des DCE bestätigt, aus denen wesentliche Informationen in Gesprächen während des Experiments und der darauf aufbauenden Gruppendiskussion entnommen werden konnten. Lassen sich daraus auf Grund des geringen Stichprobenumfangs – mehr war in diesem Punkt des Projektes nicht leistbar – auch keine signifikanten und repräsentativen Aussagen über Motive und Kapazitäten für Maßnahmen bzw. den Einfluss von Umwelt- und Kosteninformationen auf die Maßnahmenentscheidung treffen, geben die hier generierten qualitativen Ergebnisse doch wichtige Hinweise darauf, dass solche Informationen Wirkung entfalten. Ferner liegt damit eine gut nutzbare Grundlage für die Fragengestaltung künftiger quantitativer Erhebungen vor. Hier gilt es daher, in der weiteren Forschung anzusetzen und mit umfangreicheren Erhebungen gesicherte und übertragbare Ergebnisse zu generieren.

3.5.7 Empfehlungen

Empfehlungen auf der regionalen Ebene und bezüglich der Steuerungsmöglichkeiten des Energiepflanzenbaus finden sich in Kapitel 4.1.

3.5.7.1 Einsatz der neu entwickelten Werkzeuge für die Unterstützung von Umweltmaßnahmen auf Betriebsebene

Die Untersuchungen auf der Ebene der landwirtschaftlichen Betriebe haben gezeigt, dass hier ein Potenzial für die Selbststeuerung besteht, das jedoch durch Managementinstrumente, Beratung sowie Vorgaben oder Anreize von den Stromerzeugern gestützt werden sollte. Auf diesem Wege könnte sowohl die Transparenz gegenüber dem Verbraucher als auch die lokale und regionale Akzeptanz des Energiepflanzenanbaus verbessert werden. Die Bereitschaft der Landwirte bezieht sich allerdings auf ganz bestimmte Umsetzungsfelder, die von den ökonomischen Rahmenbedingungen sowie den Präferenzen der Landwirte bestimmt werden. Die Steuerung durch die kommunale und regionale Ebene kann also nicht ersetzt, sondern nur entlastet werden.

Im Zuge des Projektes wurden Werkzeuge entwickelt, die die Potenziale der Betriebsebene unterstützen und aktivieren können. Sie dienen der Bewertung von Auswirkungen des (u.a.) Energiepflanzenanbaus auf die Habitatqualität und den THG-Ausstoß und können so Landwirten dabei helfen, ihre betriebsinternen Umweltleistungen schlaggenau zu bewerten und zu visualisieren. So kann das THG-Tool CO_2-Emissionen aus der Umwandlung von Grünland in Acker und der landwirtschaftlichen Moornutzung oder N_2O-Emissionen aus der N-Düngung räumlich differenziert darstellen. Die Qualität der Ergebnisse ist allerdings stark abhängig von der nutzbaren Datenbasis. Dies gilt vor allem für die Bewertung der CO_2-Emissionen, wie die vergleichende Anwendung von Bodenkarten unterschiedlicher Auflösung zeigte. Eine kostengünstige Bereitstellung von Kartenmaterial mit ausreichender Auflösung ist hier (sowie bei anderen Themenkarten wie z.B. dem BEP) zwingende Voraussetzung für eine korrekte Flächenbewertung. Für eine vollständige Bewertung der N_2O-Emissionen sollte zusätzlich zu den direkten N_2O-Emissionen künftig auch der Einfluss standortabhängiger Bewirtschaftung auf die indirekten N_2O-Emissionen bewertet werden. Hier gilt es, für Landwirte und Berater praktikable oder operationalisierbare Modelle zu entwickeln.

Mit dem weiterentwickelten Artenschutz-Tool kann der Einfluss der Flächenbewirtschaftung auf die Lebensraumqualität von Flora und Fauna bewertet werden. Die schlaggenaue Bewertung und Visualisierung der Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf diese und weitere Naturgüter mit Programmen wie MANUELA kann dem Landwirt ein wichtiges Instrument zur Aufklärung über tatsächliche Bewirtschaftungsauswirkungen sein. Dass Information und Aufklärung gerade im Energiepflanzenanbau immer wichtiger wird, bestätigten sowohl die Landwirte des Experteninterviews als auch des DCE. Sie kann dazu dienen, die aufgeheizte Debatte um mögliche Konsequenzen des Energiepflanzenanbaus zu

versachlichen. Sie kann und sollte aber vor allem dazu dienen, dem Landwirt Hinweise über einen möglichen ökologischen Optimierungsbedarf und die dafür geeignete Standortwahl zu geben. Auf Basis des Deckungsbeitragsrechners (siehe Kap. 3.3.3.4) kann der Landwirt oder sein Berater die Rentabilität und den eventuellen Förderbedarf der Maßnahme prüfen.

Die Ergebnisse der Interviews lassen sich aufgrund ihrer qualitativen Ausrichtung und der damit zusammenhängenden geringen Stichprobenzahl nicht als allgemeingültig bewerten. Sie können allerdings Ansatzpunkte für die Formulierung quantitativer Interviews bieten, um entsprechende Zusammenhänge verifizieren zu können. Als zusammenfassendes Ergebnis der Interviews lässt sich sagen, dass v.a. Maßnahmen mit hohem Nebennutzen für Landwirte bevorzugt wurden. Von höchster Bedeutung war dabei ein ausgeglichener Deckungsbeitrag, den es bei allen Maßnahmenimplementierungen zu beachten gilt. Außerdem werden Maßnahmen vor allem unter dem Motiv der Verminderung und Vermeidung sozialer Spannungen im Zusammenhang mit dem Anbau von Mais (u.a. Energiepflanzen) umgesetzt. Die Öffentlichkeitswirksamkeit von Maßnahmen ist deshalb für die Landwirte von besonderer Bedeutung. Maßnahmen mit geringer Außenwirkung wie Ackerrandstreifen, die Ausdehnung des Sommergetreideanbaus oder Überwinterung von Stoppeln wurden hingegen eher abgelehnt. Für die Frage, ob sich ein ökologisch optimierter Energiepflanzenanbau gemäß dem Subsidiaritätsprinzip von der Betriebsebene aus initiieren lässt, liefern diese Ergebnisse damit wichtige Hinweise, die es künftig (z.B. durch quantitative Erhebungen) zu prüfen gilt. Unter der Hypothese, dass die Ergebnisse der Interviews quantitativ repräsentativ waren, bedürften Maßnahmen mit geringer Öffentlichkeitswirkung, aber hohem Artenschutzwert einer besonderen Steuerung. Maßnahmen wie Ackerrandstreifen, die auf dem richtigen Standort implementiert einen hohen Wert für den Schutz seltener Ackerlebensgemeinschaften und Ackerarten aufweisen können, würden anderenfalls kaum umgesetzt. Die Absprache in der Fruchtartenverteilung mit Nachbarlandwirten kann ein kostengünstiges Mittel zur Erhöhung der jährlichen Fruchtartendiversität auf Landschaftsebene und damit der Bereicherung der Habitatvielfalt darstellen. Abstimmungen könnten dabei z.B. in Form von Zulieferverträgen der Anlagenbetreiber erfolgen oder aber durch die Einrichtung „runder Tische" gefördert werden.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien muss nicht zwangsläufig in einen Zielkonflikt mit dem Natur- und Umweltschutz münden. Angesichts der großen und komplexen Aufgabe des Umbaus des Energiesystems kann auf flächenspezifisch ansetzende Steuerungsinstrumente nicht verzichtet werden. Die Raum- und Umweltplanung liefern hier die Grundlagen, um die vielen situationsspezifischen Risiken und Probleme zu bewältigen und effiziente integrierte Lösungen zu finden. Der Einsatz der im Verhältnis geringen Transaktionskosten für die Planung lohnt sich. Dieses gilt auch für das Management auf Betriebsebene, das gezielt gestützt werden kann, um die übergeordneten Steuerungsebenen zu entlasten und um den Landwirten größere Handlungsfreiheit zu verschaffen.

Literatur

Albert, C., von Haaren, C. & Mahnkopf, B. (2008). Potenzialanalyse für Landschaftspflege und Naturschutzprodukte – Ermittlung des Flächen- und Finanzierungsbedarfs sowie des Erzeugungspotenzials anhand der Landschaftsrahmenplanung. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 40(11), 373–378.

Albert, C., Aurbacher, J., von Haaren, C., Mahnkopf, B. & Petermann, C. (2009). Ökonomische Auswirkungen zukünftiger Agrarentwicklungen auf die Landschaftspflege und mögliche Beiträge der Aufpreisvermarktung von Naturschutzprodukten im Landkreis Diepholz. *Berichte über Landwirtschaft* 87(3), 357–379.

Albert, C., Zimmermann, T., Knieling, J. & von Haaren, C. (2012). Social learning can benefit decision-making in landscape planning: Gartow case study on climate change adaptation, Elbe valley biosphere reserve. *Landscape and Urban Planning* 105(4), 347–360.

Albert, C., Aronson, J., Fürst, C. & Opdam, P (2014). Integrating ecosystem services in landscape planning: requirements, approaches, and impacts. *Landscape Ecology* 29(8), 1277-1285.

Albert, C., Hermes, J., Neuendorf, F., vonHaaren, C. & Rode, M. (2016). Assessing and Governing Ecosystem Services Trade-Offs in Agrarian Landscapes: The Case of Biogas. *Land* 5(1), 1-17.

Alcamo, J. (Hrsg.) (2008). *Environmental Futures: The Practice of Environmental Scenario Analysis*. Vol. 2. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Bauböck, R. (2013). *GIS-gestützte Modellierung und Analyse von Agrar-Biomassepotenzialen in Niedersachsen – Einführung in das Pflanzenmodell BioSTAR*. Göttingen. Gesichtet am 30.10.2013, http://hdl.handle.net/11858/00-1735-0000-000E-0ABB-9

Bierhals, E., von Drachenfels, O. & Rasper, M. (2004). Wertstufen und Regenerationsfähigkeit der Biotoptypen in Niedersachsen. *Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen* 24(4), 231–240.

Buhr, N., Wiehe, J., Steinkraus, K., Wolf, U., Rode, M. & Kanning, H. (2010). Handlungsempfehlungen für die natur- und raumverträgliche Optimierung des Biogas- und des BtL-Pfades. In: Rode, M. & Kanning, H. (Hrsg.): *Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade*. S. 252-273, Stuttgart.

Buhr, N., Rode, M. & Kanning, H. (2013). Effectiveness of Planning Instruments for Minimizing Spatial Conflicts of Biogas Production. *European Planning Studies* 22, 1711-1734.

Cash, D. W., Adger, W. N., Berkes, F., Garden, P., Lebel, L., Olsson, P., Pritchard, L. & Young, O. (2006). Scale and cross-scale dynamics: governance and information in a multilevel world. *Ecology and Society* 11(2), 8.

Dickel, R., Reiter, K., Roggendorf, W. & Sander, A. (2010). *Halbzeitbewertung von PROFIL Teil II – Kapitel 13, Zahlungen für Agrarumweltmaßnahmen (ELER-Code 214).* Braunschweig, Dezember 2010, S.77 ff. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.ml.niedersachsen.de/download/53754/Teil_II_-_Kapitel_13_-_Zahlungen_fuer_Agrarumweltmassnahmen_Code_214.pdf

Drösler, M., Freibauer, A., Adelmann, W., Augustin, J., Bergman, L., Beyer, C., Chojnicki, B. … (2011). Klimaschutz durch Moorschutz in der Praxis: Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt „Klimaschutz - Moornutzungsstrategien" 2006–2010. *Arbeitsberichte aus dem vTI-Institut für Agrarrelevante Klimaforschung* 04/2011. Braunschweig, Berlin, Freising, Jena, Müncheberg, Wien: vTI. Gesichtet am 30.10.2013, http://www.ti.bund.de/de/startseite/institute/ak.html

EEA (European Environment Agency 1999). Environmental indicators: typology and overview. *Technical report No 25*. Copenhagen: EEA.

EnergyMap.info (2017). *EnergyMap – Energieregionen.* Gesichtet am 30.4.2017: http://www.energymap.info/energieregionen/DE/105.html

Falk, A. (2001). *Homo Oeconomicus Versus Homo Reciprocans: Ansätze für ein Neues Wirtschaftspolitisches Leitbild?* Gesichtet am 30.10.2013, http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:25582/eth-25582-01.pdf

Flessa, H (op. 2010). Lachgasemissionen landwirtschaftlich genutzter Böden. Stand des Wissens. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hrsg.). *Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden.* KTBL-vTI vom 8. bis 10. Dezember 2010 in Bad Staffelstein, vol 483. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt, pp 103–108

Flick, U. (2010). *Qualitative Sozialforschung: Eine Einführung* (vollst. überarb. und erw. Neuausg., 3. Aufl.). Rowohlts Enzyklopädie: Vol. 55694. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt-Taschenbuch-Verl. Gesichtet am 30.10.2013, http://www.socialnet.de/rezensionen/isbn.php?isbn=978-3-499-55694-4

Freese, J., Klimek, S., Marggraf, R. (2011). Auktionen und ergebnisorientierte Honorierung bei Agrarumweltmaßnahmen. *Natur und Landschaft* 86(4), 156–159.

Fuchs, S. & Stein-Bachinger, K. (2008). *Naturschutz im Ökolandbau: Praxishandbuch für den ökologischen Ackerbau im nordostdeutschen Raum.* Mainz: Bioland-Verlag.

Fuchs, D.; Hänel, K.; Lipski, A. & Reich, M. (2011). National bedeutsame Achsen des Biotopverbunds.In: Bundesverband Beruflicher Naturschutz e.V. (BBN) (Hrsg.): *Jahrbuch für Naturschutz und Landschaftspflege,* Band 58/1: Ökologische Netzwerke für den Naturschutz: Schutzgebiete, Biotopverbund, Gewässer. Bonn, S. 43-51.

Galler, C., von Haaren, C. & Albert, C. (2015). Optimizing environmental measures for landscape multifunctionality: Effectiveness, efficiency and

recommendations for agri-environmental programs. *Journal of Environmental Management* 151, 243-237.

Gay, H.; Osterburg & B. Schmidt, T. (2004). Szenarien der Agrarpolitik - Untersuchung möglicher agrarstruktureller und ökonomischer Effekte unter Berücksichtigung umweltpolitischer Zielsetzungen. *SRU Materialien zur Umweltforschung* Nr. 37

Gläser, J. & Laudel, G. (2010). *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse: Als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen* (4. Aufl.). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwiss. Gesichtet am 30.10.2013: http://www.worldcat.org/oclc/654367709

Hahn, T. (2005). *Gesellschaftliches Engagement von Unternehmen: reziproke Stakeholder, ökonomische Anreize, strategische Gestaltungsoptionen* (1. Aufl.). Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. Gesichtet am 30.10.2013: http://www.worldcat.org/oclc/76676664

Höper, H. (2007). Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren: Emission of greenhouse gases from German peatlands. *TELMA* 37, 85–116.

Höper, H. (2008). Treibhausgasfreisetzung organischer Böden. In Umweltbundesamt (Hrsg.), *Texte* 25/08. UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“ am 22./23. Januar 2008, S. 105–109. Dessau: UBA.

Höper, H. (2009a). Die Rolle von organischen Böden als Kohlenstoffspeicher. *NNA-Berichte* 2009(1), 91–97.

Höper, H. (2009b). C-Vorräte. *Vergleich A–G nach Bodenklasse*. Unveröffentlicht.

Hofmeister, H. & Garve, E. (2006). *Lebensraum Acker:* (Reprint der 2., neu bearb. Aufl.). Remagen: Kessel. Gesichtet am 30.10.2013: http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2790726&prov=M&dok_var=1&dok_ext=html

IPCC (1996). Climate change 1995: *Impacts, adaptation and mitigation of climate change. Scientific, technical analysis.* Contribution of working group II to the 2nd assessment reports of the IPCC: Cambridge University Press.

Jedicke, E. (1990). *Biotopverbund: Grundlagen und Maßnahmen einer neuen Naturschutzstrategie*. Stuttgart: Ulmer. Gesichtet am 30.10.2013: http://www.worldcat.org/oclc/22036999

Karpenstein-Machan, M. & Weber, C. (2010). Energiepflanzenanbau für Biogas-anlagen. Veränderungen in der Fruchtfolge und der Bewirtschaftung von Ackerflächen in Niedersachsen. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 42, 312–320.

Knispel, S. & Rode, M. (2010). Agrarumweltmaßnahmen im Biomasseanbau – Lösungsansätze zur Steigerung ihrer Attraktivität. In: Reich, Michael & Rüter, Stefan (Hrsg.): *Energiepflanzenanbau und Naturschutz. Umwelt und Raum*, Band 1, S. 43-66, Cuvillier Verlag, Göttingen.

Lamersdorf, N., Schulte-Bisping, H. (2010). Bodenökologie. In: DBU (Hrsg.): *Kurzumtriebsplantagen - Handlungsempfehlungen zur naturverträglichen Produktion von*

Energieholz in der Landwirtschaft - Ergebnisse aus dem Projekt Novalis. Steinbacher Druck, Osnabrück. S. 14-25.

Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen (LSKN 2010). *Landwirtschaftszählung 2010 – Bodennutzung*; 0101 T Landwirtschaftliche Betriebe insgesamt 2010 nach jeweiligen Flächen und Anbaukulturen.

Lißmann, G. (2013). *Schussschneisen sollen Wildschäden verhindern: Modellvorhaben des BMELV in Baunatal vorgestellt.* Gesichtet am 30.10.2013, http://www.lw-heute.de/?redid=31123

Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity.* Malden, Ma: Blackwell Pub.

Müller, U. & Waldeck, A. (2011). Auswertungsmethoden im Bodenschutz: Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS) (8., erw. und erg. Aufl., Version: 09.11.2011). *GeoBerichte:* 19. Hannover: LBEG Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

Müller-Sämann, K., Reinhardt, G., Vetter, R. & Gärtner, S. (2003). *Nachwachsende Rohstoffe in Baden-Württemberg: Identifizierung vorteilhafter Produktlinien zur stofflichen Nutzung unter besonderer Berücksichtigung umweltgerechter Anbauverfahren.* Vorhaben im Rahmen des Förderprojektes „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS). Gesichtet am 30.10.2013: http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1159868_l1/BWplus_Endbericht.pdf

Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2013). *Informationsbroschüre über die einzuhaltenden anderweitigen Verpflichtungen – Cross Compliance.* Ausgabe 2013 für Niedersachsen und Bremen. Stand: Januar 2013. Gesichtet am 30.10.2013: http://www.ml.niedersachsen.de/download/74905/Ausgabe_2013.pdf

Nitsch, H., Osterburg, B. & Roggendorf, W. (2009). *Landwirtschaftliche Flächennutzung im Wandel: Folgen für Natur und Landschaft.* Gesichtet am 30.10.2013: http://imperia.verbandsnetz.nabu.de/imperia/md/content/nabude/landwirtschaft/gruenland/gap-reform.pdf

Nitsch, H., Osterburg, B., Laggner, B. & Roggendorf, W. (2010). *Wer schützt das Grünland? – Analysen zur Dynamik des Dauergrünlandes und entsprechender Schutzmechanismen*. Vortrag anlässlich der 50. Jahrestagung der GEWISOLA. Gesichtet am 30.4.2017: www.ageconsearch.umn.edu/bitstream/93940/2/A3_3.pdf

Pannell, D. J., Marshall, G. R., Barr, N., Curtis, A., Vanclay, F. & Wilkinson, R. (2006). Understanding and promoting adoption of conservation practices by rural landholders. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 46(11), 1407.

Region Hannover (2010). *Biotoptypenkartierung der Region Hannover.*

Reich, M. & Rüter, S. (Hrsg.) (2011). Auswirkungen des großflächigen Anbaus von Energiepflanzen auf die Tierwelt der Agrarlandschaft. *Umwelt und Raum*, Band 2. Göttingen: Cuvillier.

Reich, M., Rüter, S. & Tillmann, J. E. (2011). Auswirkungen des großflächigen Anbaus von Energiepflanzen auf die Tierwelt der Agrarlandschaft: Ergebnisse des Forschungsvorhabens SUNREG III. In Reich, M. & Rüter, S. (Hrsg.): Umwelt und Raum, Band 2. Auswirkungen des großflächigen Anbaus von Energiepflanzen auf die Tierwelt der Agrarlandschaft. 1. Aufl., S. 5–18. Göttingen: Cuvillier.

Rode, M. (2016). Nature conservation as part of a multifunctional use of suburban landscapes. In Wang, F. & Prominski, M. (Hrsg.): *Urbanization and locality - strengthening identity and sustainability by site-specific planning and design.* S. 323-343. Springer Verlag: Heidelberg - New York – Dordrecht – London. DOI 10.1007/978-3-662-48494-4

Rode, M. & Kanning, H. (Hrsg.) (2010). *Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade*. Stuttgart: ibidem-Verlag. Gesichtet am 30.10.2013, http://www.worldcat.org/oclc/686760048

Rost, N. (2008). Der Homo Oeconomicus: Eine Fiktion der Standardökonomie. *Zeitschrift für Sozialökonomie* 45(158-159), 50–58. Gesichtet am 30.10.2013: http://www.dreigliederung.de/download/2008-12-001.pdf

Saathoff, W., von Haaren, C. & Rode, M. (2013). Scale-relevant impacts of biogas crop production: A methodology to assess environmental impacts and farm management capacities. In Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J. (Hrsg.): *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach.* S. 181–216. Springer Verlag: Dordrecht – Heidelberg – New York – London.

Schertler, K. & Bilau, A. (2010). *Kulturlandpläne: Umsetzung von mehr Naturschutz-maßnahmen auf Biohöfen*. Gesichtet am 30.10.2013: http://orgprints.org/18220/6/18220-06OE080-bioland-schertler-2010-kulturlandplaene.pdf

Schnotz, W. (2002). Towards an Integrated View of Learning From Text and Visual Displays. *Educational Psychology Review* 14(1), 101–120.

Thünen-Institut (2013). *Projektübersicht. Einfluss des Grünlandumbruchs auf die Prozesse der C- und N-Transformation in Böden und ihre Bewertung im Kontext der Klima-wirksamkeit.* Gesichtet am 30.4.2017: https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/gruenlandumbruch-und-treibhausgasemissionen

Ulber, L., Klimek, S., Steinmann, H.-H., Isselstein, J. & Groth, M. (2011). Implementing and evaluating the effectiveness of a payment scheme for environmental services from agricultural land. *Environmental Conservation* 38, 464-472.

UBA (Umweltbundesamt (Hrsg.) 2006). *Climate change: 03/06. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar: Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen.* Dessau: Umweltbundesamt.

SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2002). *Umweltgutachten 2002 - Für eine neue Vorreiterrolle.* 549 S., Stuttgart: Metzler-Poeschel

SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2004). *Umweltgutachten 2004 - Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern.* Bundesdrucksache 15/3600

SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2007). *Umweltverwaltungen unter Reformdruck - Herausforderungen, Strategien, Perspektiven.* Berlin: Erich Schmidt Verlag.

van Elsen, T. & Daniel, G. (2000). *Naturschutz praktisch: Ein Handbuch für den ökologischen Landbau. Praxis des Ökolandbaus.* Mainz: Bioland-Verlag.

Veldkamp, A. &Fresco, L.O. (1996) CLUE : a conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecological modelling* 85 (2-3), 253-270

Verburg, P. (2010). *The CLUE model. Course material.* Amsterdam.

von Drachenfels, O. (2012). *Einstufungen der Biotoptypen in Niedersachsen.* Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen 32(1), 1–60.

von Haaren, C. (Hrsg.) (2004). *Landschaftsplanung.* 527 S., Stuttgart: Ulmer.

von Haaren, C. & Bathke, M. (2008). Integrated landscape planning and remuneration of agri-environmental Services. Results of a case study in the Fuhrberg region of Germany. *Journal of Environmental Management* 89: 209–221.

von Haaren, C., Hülsbergen, K.-J. & Hachmann, R. (2008). *Naturschutz im landwirtschaftlichen Betriebsmanagement: EDV-Systeme zur Unterstützung der Erfassung, Bewertung und Konzeption von Naturschutzleistungen landwirtschaftlicher Betriebe.* Stuttgart: ibidem-Verl. Gesichtet am 30.10.2013: http://www.gbv.de/dms/zbw/568926889.pdf

von Haaren, C., Kempa, D., Vogel, K. & Rüter, S. (2012). Assessing biodiversity on the farm scale as basis for ecosystem service payments. *Journal of Environmental Management* 113, 40–50.

von Haaren, C., Palmas, C., Boll, T., Rode, M., Reich, M., Niederstadt, F. & Albert, C. (2013). Erneuerbare Energien – Zielkonflikte zwischen Natur- und Umweltschutz. In: BBN (Hrsg.): Neue Energien – Neue Herausforderungen: Naturschutz in Zeiten der Energiewende. *Jahrbuch Naturschutz und Landschaftspflege* 59, 18-33.

Von Haaren, C., Albert, C., Barkmann, J., de Groot, R., Spangenberg, J., Schröter-Schlaack, C. & Hansjürgens, B. (2014). From explanation to application: introducing a practice-oriented ecosystem services evaluation (PRESET) model adapted to the context of landscape planning and management. *Landscape Ecology* 29(8), 1335-1346.

Verdi, M. P. & Kulhavy, R. W. (2002). Learning With Maps and Texts: An Overview. *Educational Psychology Review* 14(1), 27–46.

Wiehe, J., von Ruschkowski, E., Rode, M., Kanning, H. & von Haaren, C. (2009). Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf die Landschaft am Beispiel des Maisanbaus für die Biogasproduktion in Niedersachsen. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 41(4), 107–113.

Wiehe, J., Rode, M. & Kanning, H. (2010a). Raumanalyse I: Auswirkungen auf Natur und Landschaft. In Rode, M. & Kanning, H. (Hrsg.): *Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade*. S. 21–90. Stuttgart: ibidem-Verlag.

Wiehe, J., Buhr, N., Wolf, U., Kanning, H. & Rode, M. (2010b). Planerische Koordinierung für einen natur- und raumverträglichen Ausbau energetischer Biomassepfade. In Rode, M. & Kanning, H. (Hrsg.), *Ökologische Optimierung der Produktion und energetischen Nutzung von Biomasse – Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade (SUNREG II).* S. 241-253. Stuttgart: ibidem-Verlag.

Wix, N., Reich, M. & Rode, M. (2017). Auswirkungen von Blühstreifen auf die Biodiversität und ihre Eignung als produktionsintegrierte Kompensationsmaßnahme bei der Biogasproduktion. *Umwelt und Raum*. Im Druck. Hannover: Institut für Umweltplanung.

3.6 Sicherung der landwirtschaftlichen Rohstoffbasis für Energiepflanzen – Entscheidungsverhalten landwirtschaftlicher Betriebsleiter

Gesa Sophie Holst[16], *Oliver Mußhoff*[17], *Karol Granoszewski*[18], *Christian Reise*[19]

3.6.1 Einleitung

Fossile Energieträger sind endliche Ressourcen und tragen durch die CO_2-Freisetzung bei ihrer energetischen Nutzung maßgeblich zur Klimaerwärmung bei. Um langfristig eine klimaverträgliche Energieversorgung im Allgemeinen und in Deutschland im Speziellen sicherzustellen, wird ein Ausbau erneuerbarer Energien angestrebt (z.B. BMU & BMELV 2009).

Die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen wird durch das „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien" gefördert (Bundesgesetzblatt 2011). Dieses hat zum Ziel, einen Anteil der Erneuerbaren Energien in Deutschland von 35% bis zum Jahr 2020 und 85% bis zum Jahr 2050 an der Gesamtstromerzeugung zu erreichen. Biomasse stellte 2015 8,6 % des Bruttostromverbrauchs zur Verfügung und ist nach dem Wind mit 13,3 % die zweit wichtigste erneuerbare Stromquelle (BMWi 2017). Für einen nachhaltigen Ausbau der Stromproduktion aus Biomasse in Biogasanlagen ist die langfristige Versorgung mit Substraten notwendig. Dabei liegt ein Fokus auf den Substratlieferverträgen zwischen Substratanbauer und Biogasanlagenbetreiber. Auf Grund dessen muss das Entscheidungsverhalten der realen Akteure auf betrieblicher Ebene hinsichtlich der Bereitschaft berücksichtigt werden, Biogassubstrat anzubauen und bereit zu stellen. Diese Anbaubereitschaft hängt u.a. von den angebotenen Verträgen sowie den politischen Rahmenbedingungen ab und steht im Mittelpunkt des Kapitels. In Kapitel 3.3.3.4 erfolgt eine ökonomische und ökologische Bewertung der Auswirkungen des Energiepflanzenausbaus in Bezug auf Änderungen im landwirtschaftlichen Produktionsprogramm. Weiterhin wird untersucht, wie sich Änderungen der ökonomischen und institutionell-rechtlichen Rahmenbedingungen auf das Produktionsprogramm der Landwirte und insbesondere den Substratanbau für Biogasanlagen auswirken (Politikfolgenabschätzung).

Zunächst werden die Auswirkungen von Änderungen der politischen Rahmenbedingungen auf das Produktionsprogramm der Landwirte und den Anbau von Energiepflanzen zur Bereitstellung von Biogassubstrat betrachtet. Der Focus

[16] Autorin Kapitel 3.6.1 – 3.6.3
[17] Autor Kapitel 3.6.1 – 3.6.3
[18] Autor Kapitel 3.6.1 & 3.6.4
[19] Autor Kapitel 3.6.1 & 3.6.3

wird insbesondere auf das Verhalten gegenüber alternativen Biogassubstraten, hier spezielle Blühmischungen, gelegt. Im Anschluss daran erfolgt ein detaillierter Blick auf die Möglichkeiten der Ausgestaltung von Substratlieferverträgen. Hierbei werden Präferenzen von Landwirten gegenüber wichtigen Vertragsinhalten aufgezeigt, um von Landwirten akzeptierbare Vertragsangebote erstellen zu können. Um Landwirte zur vertraglichen Biomasselieferung zu motivieren, ist u.U. neben der Optimierung von Verträgen jedoch auch eine grundsätzliche Akzeptanzschaffung von vertraglichen Kooperationen notwendig. Deshalb konzentriert sich ein weiterer Teil der Ausführungen auf die Untersuchung von Hintergründen vertraglicher Zusammenarbeit. Die Treiber und Hemmnisse vertraglicher Kooperationen werden anhand einer Segmentierung von Unternehmertypen differenziert analysiert und Unterschiede hinsichtlich ihrer Bindungsbereitschaft herausgestellt.

Die Ergebnisse sollen einen Beitrag dazu leisten, die Rohstoffbasis auch zukünftig sichern zu können und einen weiteren Ausbau der Energieproduktion in Biogasanlagen so zu gewährleisten.

3.6.2 Anbauprogrammentscheidungen von Landwirten vor dem Hintergrund veränderlicher politischer Rahmenbedingungen: ein Unternehmensplanspiel

3.6.2.1 Problembeschreibung

Im Zeitraum von 2001 bis 2016 stieg die Anzahl der Biogasanlagen bundesweit von 1.300 auf ca. 9000 mit einer installierten Gesamtleistung von 4166 Megawatt an (FVB 2016). Damit einhergehend hat auch die Anbaufläche für Biogaspflanzen stark zugenommen auf 1 393.000 ha, davon 894.000 ha Mais im Jahr 2015 (FNR 2016).

Mais ist die bisher favorisierte Pflanze zur Stromerzeugung in Biogasanlagen, da er hohe Trockenmasseerträge und gute Energiegehalte bietet (Herrmann 2013). Der Ausbau der Energieproduktion aus Biomasse wird jedoch nicht ausschließlich positiv gesehen. Der Maisanbau führt zu immer stärkeren Umweltproblemen wie beispielsweise der Verschmutzung des Grundwassers mit Nährstoffen oder dem Verlust von organischer Substanz im Boden (Herrmann 2013, s. auch Kap. 3.3). Für den weiteren Ausbau der Stromproduktion aus Biomasse ist es daher unerlässlich, die Interessen der Biogassubstrat-produzierenden Landwirte und des Naturschutzes einander anzunähern. Ein erster Schritt der Politik war dazu die Deckelung des Einsatzes von Mais und Getreidekorn einschließlich Corn-Crop-Mix und Körnermais sowie Lieschkolbenschrot in Biogasanlagen auf 60 Masseprozent (Bundesgesetzblatt 2011).

Eine Vielzahl alternativer Biogassubstrate, wie beispielsweise die Durchwachsene Silphie, Sudangras und Hirse, werden diskutiert. Vermehrt wird jedoch auch der Einsatz von speziellen Blühmischungen in Biogasanlagen erforscht. In ersten Ergebnissen zeigt sich, dass sich Substrate von Blühflächen gut zur Vergärung in

Biogasanlagen eignen und weitere Vorzüge aufweisen (Vollrath & Kuhn 2010, s. auch Kap. 3.3). Von Vorteil sind ein geringer Arbeitsaufwand beim Anbau und die Schaffung von Lebensräumen für Wildtiere, aber auch die Auflockerung des Landschaftsbildes und die damit verbundene Akzeptanzsteigerung der modernen Landwirtschaft durch die positive Reaktion der Bevölkerung auf Felder, die von Blühstreifen umgeben sind (Vollrath & Kuhn 2010).

Aus den dargestellten Gründen kann ein Politikziel darin bestehen, den Blühflächenanbau fest in die Produktionsprogrammplanung der Landwirte zu integrieren. Die Einführung einer neuen Politikmaßnahme ist jedoch immer mit hohen Kosten verbunden (Gong & Janssen 2012). Daher ist vor der Politikänderung eine Politikfolgenabschätzung unerlässlich, um festzustellen, ob eine Politikmaßnahme wirksam ist oder eine ungewollte Wirkungsweise auftritt. Eine diesbezügliche Möglichkeit besteht darin, Modelle zu entwickeln, welche die Folgen der Politikeinführung simulieren (Lensink & Londo 2010). Häufig setzen diese Modelle rational handelnde Gewinnmaximierer voraus (Veetil 2011). Jedoch verfolgen Entscheider häufig mehrere Ziele wie beispielweise Gewinnerwirtschaftung, Sicherheitsbestreben, Traditionen, Freizeitgestaltung oder soziale Anerkennung (Benz 2009). Weiterhin handeln Entscheider vielfach begrenzt rational (Selten 1990) und vertrauen auf Urteilsheuristiken (Kahneman & Tversky 1979). Aus diesem Grund können *Rational Choice*-Modelle zur Politikfolgenabschätzung die Politikfolgen verzerrt widerspiegeln. An diesen Limitationen können Laborexperimente und insbesondere Unternehmensplanspiele ansetzen, bei entsprechender Ausgestaltung. Sowohl in Laborexperimenten als auch in Planspielsituationen besteht die Möglichkeit, Anreize zu setzten, um die Teilnehmer zu „guten" Entscheidungen zu motivieren (Hertwig & Ortmann 2001). Planspiele bieten zusätzlich die Möglichkeit der realitätsnahen Ausgestaltung der Entscheidungssituationen (Levitt & List 2007). Dies stellt einen wichtigen Vorteil gegenüber Laborexperimenten dar. Planspiele scheinen sich daher insbesondere für die Politikfolgenabschätzung zu eignen.

Mit der Politikfolgenabschätzung soll explizit die Reaktion von Landwirten auf die Einführung von Politiken untersucht werden, die den Anteil an Blühflächen im Produktionsprogramm steigern sollen. Das zu diesem Zweck entwickelte mehrperiodische Einpersonen-Unternehmensplanspiel ist so ausgestaltet, dass die Landwirte in eine realistische Entscheidungssituation versetzt und im Spielverlauf mit verschiedenen Politikmaßnahmen konfrontiert werden. Mit Hilfe der im Experiment beobachteten Reaktionen der Landwirte soll den folgenden Fragen nachgegangen werden:

1. Hat die Einführung von Belohnungen und Bestrafungen Auswirkungen auf den Blühflächenanteil im Anbauprogramm der Landwirte?
2. Wirkt eine Belohnungs- oder Bestrafungspolitik mit identischer Gewinnwirksamkeit effektiver?
3. Wird durch die Politikänderung erreicht, dass Blühfläche als Biogassubstrat eingesetzt wird?

3.6.2.2 Methode

Die Teilnehmer des Planspiels wissen, dass sie an einem Experiment teilnehmen und ihr Entscheidungsverhalten dokumentiert und analysiert wird. Während des Planspiels versetzen sich die Teilnehmer in die Lage, einen 100 Hektar großen Ackerbaubetrieb zu leiten. Dieser Betrieb soll von den Teilnehmern über zwölf Produktionsperioden erfolgreich geführt werden. Jede Produktionsperiode stellt eine Spielrunde dar und erfordert von den Teilnehmern folgende grundlegende Entscheidungen:

1. Anbauprogrammentscheidung: Gestaltung des Anbauprogramms zur Bewirtschaftung des Ackerlandes mit den Produktionsverfahren Weizen, Silomais, Hirse und Blühfläche.
2. Vertragsentscheidung: Abschluss eines Substratliefervertrages über 0 t, 1500 t, 3000 t oder 4500 t Frischmasse für eine benachbarte Biogasanlage. Für die Erfüllung der Lieferpflicht kommen Silomais, Hirse und Blühfläche in Betracht.

Im Unternehmensplanspiel sind weitere a) deterministische und b) stochastische Parameter gegeben:

a) Die *deterministischen Parameter* werden zu Beginn des Planspiels kommuniziert, ändern sich nicht zufällig und gelten für alle Planspielteilnehmer gleichermaßen. Zu Spielbeginn verfügt jeder Planspielunternehmer über ein Startkapital von 100.000 €. Privatentnahmen in Höhe von 30.000 € werden in jeder Produktionsperiode getätigt, um die Lebenshaltungskosten zu decken. Des Weiteren wird jedem Teilnehmer nach jeder abgeschlossenen Produktionsperiode eine Flächenprämie in Höhe von 300 €/ha zugesagt. Es wird jedoch gleichzeitig darauf hingewiesen, dass es während des Spielverlaufs zu diesbezüglichen Änderungen kommen kann. Eine Produktionsperiode ist abgeschlossen, sobald ein Teilnehmer sein Produktionsprogramm festgelegt und seine Vertragsentscheidung getroffen hat. Zu beachten ist weiterhin, dass die gesamte Fläche des Betriebes bestellt werden muss. Winterweizen dient allein dem Verkauf am Spotmarkt, wohingegen Mais verkauft wird und zur Erfüllung des Liefervertrages dient. Der Hirseanbau dient allein der Erzeugung von Biogassubstrat. Blühfläche hingegen hat zwei Nutzenalternativen. Zum einen kann Blühfläche als Biogassubstrat angebaut werden. Zum anderen dienen Blühflächen als freiwillige Naturschutzmaßnahme. Die abgeschlossene Substratliefermenge wird mit 35 €/t vergütet unabhängig davon, ob die Frischmasse durch Mais, Hirse oder Blühfläche bereitgestellt wird.

b) Die *stochastischen Parameter* verändern sich von Planspielperiode zu Planspielperiode zufällig und variieren deshalb auch zwischen den Teilnehmern. Die Marktpreise für Winterweizen und Silomais sind volatil. Auch die auftretende Wetterlage beeinflusst die Deckungsbeiträge der Produktionsverfahren. Es wird zwischen überdurchschnittlicher, durchschnittlicher und unterdurchschnittlicher Wetterlage unterschieden. Gutes Wetter hat zur Folge, dass die

Hektarerträge aller Kulturen ihr Maximum erreichen, wohingegen bei schlechtem Wetter die Erträge auf das Minimum absinken. Trotz der unsicheren Hektarerträge muss der gewählte Liefervertrag zu 100% erfüllt sein. Ist dies nicht der Fall, muss die fehlende Substratmenge auf dem Markt zum doppelten aktuellen Marktpreis von Mais zugekauft werden. Da es keine Lagermöglichkeiten für die Erntegüter gibt, werden alle Güter am Ende einer jeden Periode zu den aktuellen Preisen verkauft.

Während der ersten 6 Produktionsperioden ist die Ausgestaltung des Planspiels für alle Teilnehmer identisch. Ab der 7. Produktionsperiode treten folgende Politikszenarien auf:

Szenario 1 (Referenzszenario): Die politischen Rahmenbedingungen bleiben über die gesamte Dauer des Planspiels unverändert.

Szenario 2 (Belohnungsszenario): Die Teilnehmer werden darüber informiert, dass die Flächenprämie um 10% auf 270 €/ha sinkt. Gleichzeitig führt die Politik eine zusätzliche Prämie von 300 €/ha für nachhaltige und akzeptanzfördernde Landwirtschaft durch den Anbau von Blühmischungen ein. Maximal zahlt der Staat jedoch 3000 € pro Unternehmen und bezuschusst damit maximal 10 ha Blühflächenanbau.

Szenario 3 (Bestrafungsszenario): Die Politik bestraft die Planspielunternehmer, die weniger als 10% ihrer Ackerfläche für den Anbau von Blühmischungen nutzen. Jeder Hektar, der zur Erfüllung der Anbaupflicht fehlt, wird mit einer Sanktion von 300 € belegt.

Um Teilnehmer für das Planspiel zu gewinnen, wird eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 10 € pro Person gezahlt. Zur Erzielung von Anreizkompatibilität werden zusätzlich monetäre Anreize für ökonomische Entscheidungen gesetzt, die einem erwartetem Gewinn von 16,71 € pro Person entsprechen.

3.6.2.3 Ergebnisse

Zur Auswertung werden gepoolte Regressionsmodelle zur Erklärung des Blühflächenanbauumfangs geschätzt (Tabelle 3-16). Dabei sind vier Ausgangssituationen zu unterscheiden: Der Blühflächenanbau aller Politikszenarien in den ersten 6 Produktionsperioden stellt die Referenzsituation dar. Die Politikszenarien 1 bis 3, die ab der siebten Periode auftreten, spiegeln die Effekte der Politikeinführung wider. Sie werden in der Tabelle mit Dummyszenario 1 bis 3 bezeichnet und beziehen sich im geschätzten Modell auf die Ausgangssituation der ersten sechs Produktionsperioden. Die Modelle 1 und 2 beleuchten die Effekte getrennt nach den Anbaualternativen der Blühmischung: zum einen für die Biogaserzeugung und zum anderen zu Naturschutzzwecken.

Lediglich durch die Einführung einer Bestrafungspolitik ist der Anteil der Blühfläche signifikant gestiegen, obwohl die Politiken hinsichtlich ihrer Gewinnwirkung identisch sind. Teilnehmer, die mit der Bestrafungspolitik konfrontiert werden, bau-

en durchschnittlich 2,720 ha mehr Blühfläche als Biogassubstrat (Modell 1) und 2,456 ha mehr Blühfläche als Naturschutzmaßnahme (Modell 2) im Vergleich zu den Referenzperioden 1 bis 6 an. Keine signifikanten Veränderungen treten bei Beibehaltung des Referenzszenarios über die Perioden 7 bis 12 sowie der Einführung einer Belohnungspolitik im Vergleich zu der Referenzsituation der Perioden 1 bis 6 auf. Folglich hat nur die Abschreckungsstrategie der Bestrafungspolitik eine verhaltenssteuernde Wirkung auf die Landwirte im Hinblick auf den Blühflächenanbau. Die Wirkungen der Belohnungs- und der Bestrafungspolitik sind mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10% signifikant verschieden voneinander. Dies zeigt sich durch die zusätzliche Aufnahme einer Restriktion in die Modelle.

Tabelle 3-16: Ergebnisse der Paneldatenanalyse

	Modell 1 Abhängige Variable: Blühfläche Biogas			**Modell 2** Abhängige Variable: Blühfläche Naturschutz		
	Koeffizient	t-Statistik		Koeffizient	t-Statistik	
Konstante	8,775	2,437	**	19,239	4,254	***
Dummyszenario 1	0,493	0,616		0,653	0,938	
Dummyszenario 2	0,948	1,084		1,337	1,470	
Dummyszenario 3	2,720	3,042	***	2,456	2,528	**
Gewinndifferenzial[b]	-1,074	-1,811	*	-0,301	-0,473	
Risikoeinstellung[c]	0,155	0,820		0,093	0,385	
Substratliefervertrag 1500 t	2,221	2,470	**	-4,427	-2,418	**
Substratliefervertrag 3000 t	2,484	2,667	***	-4,641	-2,883	***
Substratliefervertrag 4500 t	1,504	1,596		-7,627	-4,693	***
Alter in Jahren	-0,086	-2,418	**	-0,003	-0,056	
Geschlecht[d]	3,225	3,460	***	2,816	2,061	**
Bildungsjahre	-0,268	-2,073	**	-0,396	-2,379	**
Erwerbstyp[e]	-2,518	-2,012	**	-3,842	-2,313	**
Bewirtschaftung[f]	-3,259	-1,665	*	-2,256	-1,306	
Erneuerbare Energien[g]	-1,512	-1,949	*	-0,656	-0,727	
Blühfläche_Geld[h]	0,927	1,183		2,400	2,323	**
Blühfläche_Umwelt[i]	1,852	2,336	**	-0,322	-0,298	
Agrarumweltmaßnahme[j]	1,024	2,374	**	-0,049	-0,083	
F-Wert	10,777 ***			16.541 ***		
R^2	0,112			0,162		

(a) * = p-Wert < 0.10; ** = p- Wert < 0.05; *** = p- Wert < 0.01.
(b) Differenz zwischen maximal möglichem und erreichbarem Gewinn bei Politikbefolgung in 1000 €.
(c) Ergebnisse der Holt-und-Laury-Lotterie: 1-3 = risikosuchend, 4 = risikoneutral, 5-9 = risikoavers.
(d) 1 = weiblich, 0 = männlich.
(e) 1 = Haupterwerb, 0 = Nebenerwerb.
(f) 1 = konventionell, 0 = ökologisch.
(g) Haben Sie in erneuerbare Energien außer Biogasanlagen investiert? 1 = ja, 0 = nein.
(h) Denken Sie, dass mit dem Anbau von Blühflächen Geld verdient werden kann? 1 = ja, 0 = nein.
(i) Denken Sie, dass der Anbau von Blühflächen zum Naturschutze sinnvoll ist? 1 = ja, 0 = nein.
(j) Wie stehen Sie zu Agrarumweltmaßnahmen? 1 = voll ablehnend bis 5 = voll zustimmend.

Weitere Ergebnisse können den Modellen 1 und 2 entnommen werden. So zeigen die Modelle, dass soziodemografische und sozioökonomische Variablen einen signifikanten Einfluss auf das Anbauverhalten der Landwirte haben. Die Variablen „Geschlecht", „Bildungsjahre" und „Erwerbstyp" haben sowohl auf den Anbau von Blühmischungen als Biogassubstrat als auch als Naturschutzmaßnahme einen signifikanten Einfluss (Modelle 1 und 2). Weibliche Teilnehmer bauen signifikant mehr Blühfläche zur Erzeugung von Biogassubstrat und für den Naturschutz an als männliche Teilnehmer. Weibliche Landwirte stellen sich daher im Planspiel als offener gegenüber alternativen Anbauverfahren und für Naturschutzbelange dar. Landwirte, die in der Realität einen Haupterwerbsbetrieb führen, bauen im Planspiel hoch signifikant weniger Blühfläche für Biogasanlagen und zu Naturschutzzwecken an. Bei Betrachtung von Modell 1 zeigt sich, dass das „Alter" einen signifikanten Einfluss auf den Anbauumfang Blühmischung als Biogassubstrat hat. Dieser negative Einfluss des Alters deutet darauf hin, dass ältere Landwirte kritischer gegenüber alternativen Biogassubstraten sind. Demgegenüber besteht kein signifikanter Einfluss des Parameters „Alter" auf die Anbaufläche von Blühmischung zu Naturschutzzwecken (Modell 2).

Teilnehmer, die den Anbau von Blühmischungen als monetär sinnvoll einschätzen, bauen hoch signifikant mehr Blühmischungen zu Naturschutzzwecken an (Modell 2), wohingegen kein signifikanter Einfluss auf den Blühflächenanbau für Biogasanlagen (Modell 1) besteht. Halten die Landwirte den Anbau von Blühmischungen als Naturschutzmaßnahme für sinnvoll, bauen diese signifikant mehr Blühmischung als Biogassubstrat an (Modell 1). Kein signifikanter Einfluss besteht jedoch auf den Anbau von Blühmischungen zum Naturschutz (Modell 2).

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass verschiedene Faktoren auf die Reaktion und Umsetzung von Politiken wirken. Festzuhalten bleibt weiterhin, dass Landwirte potenziell bereit sind, Lieferverträge einzugehen. Der Anteil Biogassubstrat, bereitgestellt durch alternative Energiepflanzen, ist in der Planspielsituation jedoch noch gering.

3.6.2.4 Diskussion

Die Politikfolgenabschätzung mit einem Planspiel ist ein erster Schritt, um die Auswirkungen einer Politikänderung auf das Produktionsprogramm der Landwirte vorherzusagen. Die dokumentierten Reaktionen auf die Einführung einer Belohnungs- und Bestrafungspolitik sind vielversprechend und können erste Hinweise an die Politik geben.

Eine Limitation des Planspiels besteht darin, dass nicht untersucht werden kann, ob es durch die Politikeinführung zu einem *Crowding Out*-Effekt[20] hinsichtlich des Anbaus von Blühmischungen kommt. Weitere Untersuchungen sollten außerdem auf die Gründe abzielen, die Landwirte dazu bewegen, eine Politikmaß-

[20] 'Crowding Out'-Effekt beschreibt einen Verdrängungseffekt durch staatliche Eingriffe hinsichtlich privatwirtschaftlicher Tätigkeiten.

nahme überzuerfüllen und mehr als die geförderten bzw. geforderten 10 ha Blühmischung anzubauen. Des Weiteren wurden in diesem Experiment der Einfluss sozioökonomischer und soziodemografischer Charakteristika auf das Anbauverhalten von Blühflächen der Landwirte untersucht. Die Teilnehmer des Experiments waren vergleichsweise jung und repräsentieren nicht den durchschnittlichen deutschen Landwirt. Aufgrund dessen ist die Stichprobe nicht repräsentativ und die externe Validität kann nicht vollständig erreicht werden. Zur Verbesserung der externen Validität sollte das Planspiel mit einer repräsentativen Stichprobe erneut durchgeführt werden. Des Weiteren wurde mit dem Planspiel keine Verbesserungsmöglichkeit bzgl. der Ausgestaltung von Lieferverträgen untersucht. Aus diesem Grund wird nachfolgend die Ausgestaltung von Lieferverträgen in separaten Experimenten untersucht. Die Ausgestaltung von Lieferverträgen hat großen Einfluss darauf, ob Landwirte bereit sind, einen Vertrag abzuschließen. Auf die Auswirkungen der Vertragsausgestaltung wird nachfolgend eingegangen.

3.6.3 Präferenzen von Landwirten bei der Gestaltung von Substratlieferverträgen für Biogasanlagen

3.6.3.1 Problemstellung

Für den weiteren Ausbau der Biogaserzeugung ist es von zentraler Bedeutung, dass die erforderlichen Substratmengen durch die Landwirtschaft bereitgestellt werden. Oft ist bei größeren Anlagen und Anlagenbetreibern, denen eigenes Substrat nicht (in ausreichender Menge) zur Verfügung steht, eine Substratzulieferung durch Dritte notwendig. Dieses ist insofern von Bedeutung, als dass die Substratkosten rund die Hälfte der jährlichen Kosten einer Biogasanlage ausmachen (vgl. z.B. Walla & Schneeberger 2008; FNR 2009). Deshalb ist Substratlieferverträgen besondere Beachtung zu schenken. Somit stellt sich die Frage nach den Präferenzen der landwirtschaftlichen Betriebsleiter bei der Ausgestaltung von Substratlieferverträgen. Mais ist einer der bedeutendsten nachwachsenden Rohstoffe zur Gewinnung von Bioenergie (FNR 2007, 2016). Allerdings liegen bislang keine quantitativen Untersuchungen des Auswahlverhaltens von Landwirten in Bezug auf Maislieferverträge für Biogasanlagen vor. Somit ist es bisher nur eingeschränkt möglich, Aussagen hinsichtlich einer zielführenden Ausgestaltung von Maislieferverträgen zu treffen. Mittels Choice-Experimenten (CE) können die Präferenzen von Probanden bei Auswahlentscheidungen analysiert und die Entscheidungsrelevanz einzelner Merkmale des jeweiligen Untersuchungsgegenstandes bewertet werden. Für die Untersuchung der Präferenzen landwirtschaftlicher Betriebsleiter bei der Ausgestaltung von Substratlieferverträgen erscheinen CE aus verschiedenen Gründen als geeignet: Zumeist werden Verträge in der Praxis als „vertrauliche Interna" behandelt, sodass wenig Transparenz herrscht und somit keine ausreichende Datenbasis für z.B. eine ökonomische Analyse der Vertragsakzeptanz verfügbar ist. Zudem unterscheiden sich die Rahmenbedingungen der Betriebe untereinander,

wodurch einfache Vergleiche (nicht) abgeschlossener Substratlieferverträge kaum möglich sind. Daher bietet es sich an, eine direkte Bewertungsmethode (*Stated Preference Method*) zu nutzen und mit hypothetischen Entscheidungssituationen zu arbeiten. Da hier sowohl die Handlungsmöglichkeiten als auch die Rahmenbedingungen kontrollierbar sind, kann das Auswahlverhalten besser analysiert werden, als auf der Grundlage empirischer Entscheidungen (Roe & Just 2009; Just & Wu 2009). Entgegen einer offenen und direkten Abfrage werden Merkmale und Ausprägungen bei CE vorgegeben (vgl. Qin et al. 2011). Zudem kann die Interaktion der Merkmale berücksichtigt werden. Bei CE ist keine direkte Angabe einer Zahlungsbereitschaft erforderlich, weil diese durch die Analyse der Auswahlentscheidungen in Form impliziter Preise abgeleitet wird (Schmitz et al. 2003). Vorteilhaft ist zudem, dass CE über eine hohe externe Validität verfügen (vgl. z.B. Auspurg & Liebe 2011) und die Durchführung gegenüber der Kontingenten Bewertungsmethode (*Contingent Valuation Method*) kostengünstiger ist (vgl. Hoyos 2010, S. 1601). Ziel dieses Beitrags ist es, aus der Perspektive von landwirtschaftlichen Betriebsleitern wesentliche Faktoren für den Abschluss von Substratlieferverträgen zur Rohstoffversorgung von Biogasanlagen aufzuzeigen und Aussagen zur Bedeutung von ausgewählten Vertragsbestandteilen abzuleiten.

Konkret wird der Fragestellung nachgegangen: Werden von Landwirten bestimmte Vertragspartner, Vertragslaufzeiten und Preisausgestaltungen bevorzugt?

3.6.3.2 Methode

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden bei der Ausgestaltung des *Choice Experiments* (CE) abschlussrelevante „Hauptvertragsmerkmale" berücksichtigt. Die drei Hauptmerkmale „Vertragspartner", „Vertragslaufzeit" und „Verkaufspreis" werden nachfolgend kurz dargestellt. Über die Analyse von Praxisverträgen haben wir die folgenden möglichen Vertragspartner als relevant identifiziert: Landwirte, Bioenergiedörfer und außerlandwirtschaftlicher Investoren. Roe et al. (2004) stellen heraus, dass die Vertragslaufzeit und die Vergütung ausschlaggebende Faktoren sind. Eine lange Vertragslaufzeit verringert die Attraktivität eines Vertrages, kann aber durch eine höhere Vergütung ausgeglichen werden. Wir wollen dieses im Zusammenhang bei Substratlieferverträgen untersuchen und bieten dazu den Befragungsteilnehmern unterschiedlich lange Vertragslaufzeiten an: 1 Jahr, 5 Jahre und 9 Jahre.

Bei nachfolgender Untersuchung soll zwischen Verträgen zu Festpreisen und Verträgen zu Marktpreisen unterschieden werden. Erfolgt eine Vergütung zu Festpreisen, so wird der Preis über die gesamte Vertragslaufzeit mit Sicherheit vom Vertragspartner garantiert. Demgegenüber ist bei einer Vergütung zu Marktpreisen nur das Ausgangspreisniveau bzw. der erwartete (Durchschnitts-)Preis bekannt. Der Preis wird somit nicht garantiert. Um möglichst realistische Bedingungen zu schaffen, wurden die angesetzten Substratpreise aus der Literatur entnommen (vgl. z.B. FNR 2007; Keymer 2009; KTBL 2009; Gebrezgabher et al. 2010): 20, 30 und

40 €/t Silomais. Es wird angenommen, dass durch die Erzeugung von 6 t Mais ein Ertrag von 1 t Weizen verdrängt wird.

Zur Bestimmung der jeweiligen Einflussstärke auf die Auswahlentscheidung werden die Vertragskomponenten systematisch variiert. Damit lässt sich der Effekt eines jeden Merkmals auf die Auswahlwahrscheinlichkeit eines Vertrages unabhängig von den anderen Merkmalen schätzen. Darüber hinaus sollen maximale Unterschiede zwischen den Merkmalsausprägungen in einem Choice-Set erzielt werden. Dies bedeutet, dass es in einem Choice-Set so wenig wie möglich gleiche Ausprägungen pro Merkmal gibt. Im vorliegenden Fall sind 9 Choice-Sets notwendig, um diese Anforderungen optimal sicherzustellen. Allen zu befragenden Probanden werden die vollen 9 Choice-Sets in zufälliger Abfolge vorgelegt. Da die Teilnehmer zwischen einem Festpreis-Vertrag und einem Marktpreis-Vertrag wählen können, handelt es sich um ein sogenanntes labeled CE. Zudem wird eine *Opt-out*-Alternative angeboten, bei der die Möglichkeit besteht, sich für keinen der genannten Verträge zu entscheiden. Ein beispielhaftes Choice-Set ist in Tab. 3-17 dargestellt.

Tabelle 3-17: Beispielhaftes Choice-Set

	Festpreis-Vertrag	**Marktpreis-Vertrag**
Vertragspartner	Bioenergiedorf	Landwirte
Vertragslaufzeit	1 Jahr	5 Jahre
Verkaufspreis: Silomais (entspricht Weizen)	Garantiert 20 €/t (120 €/t)	Erwartet 30 €/t (180 €/t)
Ich wähle … (Bitte anklicken)	**O**	**O**

O keinen der beiden Verträge

Im Rahmen des CEs werden die Teilnehmer – aus Gründen der Vergleichbarkeit – gebeten, sich in die Lage zu versetzen, einen Ackerbaubetrieb mit 100 ha Fläche zu bewirtschaften. Für die Substratversorgung einer neu gebauten Biogasanlage in der Nähe des jeweiligen Betriebes werden den Befragten jeweils zwei alternative Substratlieferverträge für Silomais angeboten.

3.6.3.3 Ergebnisse

Die Auswertung des CE basiert auf der Untersuchung der einzelnen Auswahlentscheidungen. Jeder Betriebsleiter hat während der Befragung 9 Auswahlentscheidungen zwischen den 3 Vertragsmerkmalen „Vertragspartner“, „Vertragslaufzeit“ und „Verkaufspreis“ in den vorgelegten Choice-Sets getroffen. Somit liegen bei den 178 Teilnehmern insgesamt (9*3*178=) 4 806 Beobachtungen vor. Mittels der Software Stata 11 werden auf Basis der Daten des CE konditionale Logitmodelle geschätzt. Auf diese Weise soll der Einfluss der verschiedenen zu untersuchenden Vertragsmerkmale auf die Wahrscheinlichkeit einer Vertragsauswahl bestimmt

werden. In Modell A (vgl. Tabelle 3-18) wird zunächst davon ausgegangen, dass die Merkmale dieselben Effekte auf die Auswahl eines Festpreis- oder Marktpreis-Vertrages haben (generische Effekte). Bei dieser Annahme wird deutlich, dass die befragten Landwirte Bioenergiedörfer und andere Landwirte gegenüber außerlandwirtschaftlichen Investoren als Vertragspartner bevorzugen (signifikant positive Effekte). In Bezug auf die anderen untersuchten Vertragsmerkmale lassen sich folgende Wirkungsrichtungen feststellen: Mit steigender Vertragslaufzeit sinkt die Attraktivität eines Vertrages (signifikant negativer Effekt) und ein zunehmender Verkaufspreis erhöht die Attraktivität (signifikant positiver Effekt).

Tabelle 3-18: Ergebnisse der konditionalen Logitmodelle

	A	B	C	D
Festpreis (Konstante)	0,14*	0,04*	0,31*	-0,20
	(1,92)	(0,50)	(1,91)	(-1,44)
Bioenergiedorf	0,26**	0,24**	0,50**	
	(2,37)	(2,15)	(2,45)	
Festpreis x Bioenergiedorf			-0,79**	
			(-2,15)	
Landwirt	0,24**	0,26**		-0,21
	(2,32)	(2,15)		(-1,13)
Festpreis x Landwirt				0,71**
				(2,15)
Laufzeit	-0,08**	-0,14**	-0,14**	-0,14**
	(-5,90)	(-4,62)	(-4,62)	(-4,62)
Festpreis x Laufzeit		0,12**	-0,12**	-0,12**
		(2,27)	(2,27)	(2,27)
Preis	0,10**	0,04*	0,04*	0,04*
	(16,50)	(3,99)	(3,99)	(3,99)
Festpreis x Preis		0,13*	0,13*	0,13*
		(6,67)	(6,67)	(6,67)
Log-likelihood)	-574,49	-546,15	-546,15	-546,15
Pseudo-R^2	0,28	0,32	0,32	0,32
Beobachtungen	2304	2304	2304	2304

(a) * p<0,10; ** p<0,05; z-Werte in Klammern. In den Modellen A und B ist „Investoren" die Referenzkategorie für die Vertragspartner „Bioenergiedorf" und „Landwirte". In den Modellen C und D sind jeweils „Investoren" und „Landwirte" bzw. „Investoren" und „Bioenergiedorf" die Referenzkategorie.

Unter Verwendung der Modelle B, C und D wird untersucht, inwieweit Unterschiede zwischen Festpreis- und Marktpreis-Verträgen bestehen. Modell B zeigt, dass bei Festpreis-Verträgen der negative Effekt der Vertragslaufzeit geringer ist als bei Marktpreis-Verträgen (-0,02=-0,14+0,12 versus -0,14). Allerdings ist der positive Effekt des Verkaufspreises bei Festpreis-Verträgen höher als bei Marktpreis-Verträgen (0,17=0,04+0,13 versus 0,04). Die Modelle C und D verdeutlichen, dass bei Marktpreis-Verträgen ein Bioenergiedorf als Vertragspartner attraktiver ist als bei Festpreis-Verträgen (negativer Interaktionseffekt für Festpreis * Bioenergie-

dorf), während bei Festpreis-Verträgen Landwirte als Vertragspartner eher bevorzugt werden als bei Marktpreis-Verträgen (positiver Interaktionseffekt für Festpreis * Landwirt). Teilt man die Koeffizienten der nicht-monetären Merkmale durch das monetäre Merkmal, ergeben sich beispielhaft folgende implizite Preise: Für ein Jahr zusätzliche Vertragslaufzeit müssten die Landwirte im Durchschnitt bei einem Marktpreis-Vertrag eine zusätzliche Vertragsprämie in Höhe von 3,36 (1,82 bis 6,88) € pro Tonne Silomais als Kompensation erhalten. Zudem wären Landwirte bei Marktpreis-Verträgen im Mittel bereit, auf 12,16 (1,73 bis 26,82) € pro Tonne zu verzichten, wenn der Vertragspartner ein Bioenergiedorf ist. Möglicherweise hat der Begriff „Bioenergiedorf“ falsche Assoziationen bei den Befragungsteilnehmern hervorgerufen. Demgegenüber könnte der hohe Betrag aber auch außerökonomische Intentionen der Betriebsleiter zeigen (z.B. ein erwarteter Imagegewinn). Die impliziten Preise verdeutlichen die Bedeutung der Vertragspartner bei der Auswahl von Verträgen.

3.6.3.4 Diskussion

Im Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse ist zu bedenken, dass die Entscheidungsträger in der realen Welt, wo es um „echtes Geld“ geht, einen höheren Anreiz haben, möglichst optimale Entscheidungen zu treffen. Außerdem wird die abschließende Beurteilung eines Vertrages über die hier untersuchten Hauptvertragsmerkmale hinausgehen. In der Praxis ist es notwendig, alle Aspekte eines Vertrages simultan zu betrachten (Bogetoft & Olesen 2002). Zudem wäre es in zukünftigen Untersuchungen interessant, noch stärker nach betriebsstrukturellen und regionalen Rahmenbedingungen zu differenzieren. Es besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich möglicher Bezugsgrößen für Preisanpassungsklauseln. Von Wichtigkeit ist weiterhin, welches Substrat angebaut werden soll. Durch die zunehmende Verbreitung ist Mais gegenwärtig in die Kritik geraten. Risiken des Maisanbaus liegen z.B. in einer engen Fruchtfolge (bis hin zu Monokulturen) und zunehmendem Düngemittel- und Herbizideinsatz (vgl. BFN, 2010, siehe auch Kap. 3.5). Alternative Substrate, wie beispielsweise die Durchwachsene Silphie, sind noch nicht stark verbreitet und erfordern im Hinblick auf Substratlieferverträge weitergehende Untersuchungen. Auch der Anbau von speziellen Blühmischungen zur Erzeugung von Biogassubstrat steckt noch in den Anfängen der Forschung. Ein erster Schritt zur Analyse des Anbauverhaltens von Landwirten hinsichtlich alternativer Biogassubstrate ist das zuvor beschriebene Planspiel, welches auf den Anbau von Blühmischungen als Biogassubstrat fokussiert.

3.6.4 Akquise von Vertragslieferanten auf Basis unterschiedlicher Einstellungen und Bindungsbereitschaften

3.6.4.1 Problembeschreibung

In den vergangenen Jahren sind Trends auf dem Biogasmarkt zu beobachten die sich auf die Rohstoffversorgung auswirken. Zum einen nimmt die Anlagengröße zu (FvB 2016), sodass viele landwirtschaftliche Anlagenbetreiber ihren Rohstoffbedarf nur in wenigen Fällen durch den Anbau von Energiepflanzen auf betriebseigenen Flächen decken können, sondern auf den Zukauf von Biogassubstrat bei Berufskollegen angewiesen sind. Zum anderen treten zunehmend außerlandwirtschaftliche Akteure in den Biogasmarkt (Maron et al. 2011), die i.d.R. größere Anlagen betreiben und ohnehin aufgrund fehlender eigener Anbaufläche mit Landwirten kooperieren müssen. Um die Rohstofflieferung für die kapitalintensiven Anlagen langfristig sicherzustellen, sind (außer-)landwirtschaftliche Betreiber auf die Akzeptanz von Landwirten gegenüber Verträgen angewiesen (Dautzenberg & Hanf 2008).

Aufgrund ihres branchenfremden Hintergrunds und des dynamischen Zubaus von Biogasanlagen verfügen sektorfremde Abnehmer über begrenzte Erfahrungen bzgl. vertraglicher Zusammenarbeit mit Landwirten (ebd.). Entsprechend hoch ist ihr Informationsbedarf über deren Vertragseinstellungen. In diesem Zusammenhang kommt der Bindungsbereitschaft ein hoher Stellenwert zu, da Biomasseabnehmer ihre Rohstoffbasis aus Risikoaspekten über langfristige Verträge absichern müssen. Erschwerend dabei ist, dass Landwirte sehr unterschiedliche Vertragsmotivationen haben (Pennings & Leuthold 2000). Das Informationsdefizit der Anlagenbetreiber und differenzierte Vertragseinstellungen der Landwirte sind Ausgangspunkte für die vorliegende Untersuchung.

Auf Basis einer Befragung von 201 Landwirten wird folgenden Fragen nachgegangen:

- Inwieweit differieren Landwirte hinsichtlich ihrer Vertragseinstellungen?
- Unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer Bindungsbereitschaft?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen Vertragseinstellungen und Bindungsbereitschaft?

Die Studie soll einen Beitrag zur optimierten Akquise von Vertragspartnern liefern bzw. die Liefertreue vorhandener Lieferanten sicherstellen. Es werden Schlussfolgerungen für die Ansprache von Landwirten und die Ausgestaltung vertraglicher Kooperationen gegeben. Vor dem Hintergrund des überwiegend negativen Images von Vertragslandwirtschaft (Schulze et al. 2007) und in Anbetracht häufiger Einstellungs- und Verhaltensveränderungen auf dem Gebiet der Biogasproduktion (vgl. Granoszewski & Spiller 2012) kommen Vertragseinstellungen eine hohe Bedeutung zu.

3.6.4.2 Methoden

In dem Zeitraum April bis Juli 2011 wurde eine Befragung von 201 landwirtschaftlichen Betriebsleitern webbasiert durchgeführt. Der Fragebogen bestand aus einem allgemeinen Teil zu (Vertrags-)Einstellungen und einem speziellen Teil zu Biomasselieferverträgen. Im ersten Teil wurden Fragen bzw. Statements zur generellen unternehmerischen Orientierung, Erfahrung sowie Meinung des sozialen Umfelds zu Verträgen gestellt. Um Hintergründe über ihre Vertragsmotivationen und –akzeptanz zu erhalten, wurde ferner der Vertragsnutzen und die Gesamteinstellung zur Vertragslandwirtschaft (Vertragsbewertung) jeweils über zwei Statements erhoben. Im zweiten Teil wurden Fragen zur Bindungsbereitschaft (Umfang und Dauer einer möglichen Vertragslieferung) speziell bei Substratlieferverträgen gestellt. Die Landwirte wurden gebeten, die Statements mittels einer 5-stufigen Skala von „Stimme voll und ganz zu" bis „Lehne voll und ganz ab" zu bewerten.

Um Unterschiede in den Vertragseinstellungen abzubilden wurde eine Unternehmersegmentierung durchgeführt. Dabei wurden die Landwirte hinsichtlich ihrer Einstellungen zur Unternehmensführung, wie der Autonomiepräferenz, der Risikoaversion und der Supply-Chain-Orientierung mittels hierarchischer Clusteranalyse gruppiert. In einem weiteren Schritt wurde mittels multivariater Varianzanalysen untersucht, inwieweit sich die Unternehmertypen bezüglich ihrer Vertragseinstellungen (Nutzen und Bewertung) und ihrer Vertragsintention (Bindungsbereitschaft) unterscheiden.

3.6.4.3 Ergebnisse

Es konnten vier Segmente von Landwirten ermittelt werden, die sich hinsichtlich ihrer unternehmerischen Orientierung voneinander abgrenzen (vgl. Tab. 3-19).

Das Cluster 1 repräsentiert „sicherheitssuchende" Landwirte, die vergleichsweise risikoscheu sind. Sie sind zudem einer verstärkten vertikalen Zusammenarbeit (zwischen Landwirten und den Abnehmern ihrer Erzeugnisse) gegenüber positiv gestimmt. Die „Neutralen Einzelgänger" (Cluster 2) lehnen hingegen eine verstärkte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette deutlich ab. Die „risikobereiten kooperationswilligen" Landwirte (Cluster 3) begrüßen, ähnlich wie Cluster 1, eine verstärkte vertikale Zusammenarbeit. Allerdings sind sie deutlich weniger autonomieorientiert, dafür aber ausgesprochen risikobereit. Die „Autonomieorientierten" (Cluster 4) legen keinen besonderen Wert auf vertikale Kooperationen, sondern betonen ihre unternehmerische Autonomie. Bei den Clustern 3 und 4, handelt es sich um stärker risikobereite Unternehmer.

Alle Landwirte sind ähnlich gute Marktbeobachter (vgl. Granoszewski & Spiller 2012). Allerdings unterscheiden sie sich in ihrem Marktinvolvement. Insbesondere Landwirte des dritten Clusters unternehmen im Vergleich zu Cluster 1 und 2 hohe Anstrengungen bei der Vermarktung ihrer Erzeugnisse. Landwirte aus Cluster 3 haben, anders als ihre Berufskollegen aus Cluster 2 und 4, einschlägige Vertragserfahrungen. Die Cluster unterscheiden sich darüber hinaus hinsichtlich ihres

sozialen Umfelds. Während der jeweilige Betriebsberater die Vertragslandwirtschaft in Cluster 3 und 1 befürwortet, ist er deutlich skeptischer bei Betrieben in Cluster 4. Weiterhin auffällig ist zudem, dass Berufskollegen von Landwirten des vierten Clusters relativ kritisch eingestellt sind. Bei dem vierten Cluster handelt es sich um jüngere Landwirte. Landwirte aus Cluster 1 sind mit durchschnittlich 44,9 Jahren deutlich älter. Um zwischen den Segmenten mögliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Vertragseinstellungen und Bindungsbereitschaft zu identifizieren, werden die Cluster miteinander verglichen. Einstimmig gehen die Landwirte davon aus, Preisabschläge bei vertraglicher Vermarktung akzeptieren zu müssen. Uneinheitlich wird hingegen der Stellenwert von Verträgen für die Reduzierung von Preisvolatilitäten gesehen. Insbesondere Landwirte aus Cluster 3 schätzen Verträge als sinnvolles Risikomanagementinstrument. Landwirte der vierten Gruppe sprechen Verträgen deutlich weniger Nutzen zur Risikoreduzierung zu. Werden beide Gruppen hinsichtlich ihrer generellen Risikoeinstellung miteinander verglichen, fällt auf, dass sie ähnlich risikobereit sind und trotzdem einen preisstabilisierenden Nutzen von Verträgen unterschiedlich wahrnehmen. Hinsichtlich der Gesamtbeurteilung der Vertragslandwirtschaft unterscheiden sich die Gruppen signifikant voneinander. Während Cluster 1 und 3 vertragliche Absprachen befürworten, sind Vertreter der Gruppe 2 und 4 auffallend negativ in ihrem Gesamturteil.

Hinsichtlich der Bereitschaft für einen bestimmten Teil ihrer landwirtschaftlichen Nutzfläche Substratlieferverträge abzuschließen, bestehen signifikante Unterschiede zwischen Cluster 1 und 3. Risikofreudige Unternehmer sind bereit, der Vertragslandwirtschaft im hohen Maße nachzugehen, während ihre risikoaversen Berufskollegen einen deutlich geringeren Umfang an vertraglichen Energiepflanzenanbau präferieren. Offenbar wird der Vertragsumfang von Risikoeinstellungen begleitet. Die Autonomiepräferenz spielt dagegen eine untergeordnete Rolle, da von Cluster 4 trotz ausgeprägter Autonomiepräferenz Verträge im beachtlichen Umfang geplant werden.

Der Grad der Bindungsbereitschaft lässt sich neben dem Vertragsumfang durch die Vertragsdauer beschreiben. Die gewünschte Laufzeit eines Liefervertrages, bei dem Liefermenge und Preis fixiert sind, beträgt im Mittel 3,6 Jahre und variiert zwischen den identifizierten Segmenten. Autonomie bevorzugende Landwirte (Cluster 4) bevorzugen eine Laufzeit von 3 Jahren. Anders ihre autonomieneutralen Berufskollegen aus Cluster 1, die bereit sind, sich um rund ein Jahr länger vertraglich festzulegen. Autonomieablehnende Landwirte (Cluster 3) äußern mit 4,3 Jahren eine hohe Bindungsdauer. Cluster 2 stellt einen Sonderfall dar, da Landwirte trotz fehlender Autonomiepräferenz kürzere Laufzeiten von 3,13 Jahren bevorzugen. Auffällig hierbei ist, dass sie vertikale Zusammenarbeit vergleichsweise stark ablehnen. Vermutlich liegt hierin ein Grund für die Präferenz für kurzfristige Geschäftsbeziehungen.

Tabelle 3-19: Vertragseinstellungen der Unternehmersegmente

Gruppengröße	**Cluster 1 (a)** 66 (32,8%)	**Cluster 2 (b)** 55 (27,4%)	**Cluster 3 (c)** 44 (21,9%)	**Cluster 4 (d)** 36 (17,9%)
Clusterbildende Variablen				
Autonomiepräferenz (eta^2: 0,44; F-Wert: 55,92***)	-0,05[1] 0,86[2]	-0,14 0,81	-0,80 0,67	1,27 0,55
Risikoaversion (eta^2: 0,54; F-Wert: 75,92***)	0,91 0,53	0,08 0,81	-0,85 0,69	-0,76 0,73
Supply-Chain-Orientierung (eta^2: 0,58; F-Wert: 90,75***)	0,47 0,59	-1,20 0,71	0,70 0,74	0,13 0,55
Clusterbeschreibende Variablen				
Ich suche systematisch nach neuen Vermarktungsmöglichkeiten für meine Erzeugnisse.[3 ac+; bc*]	0,52 0,87	0,47 0,84	0,89 0,66	0,61 0,80
Verträge habe ich bereits erfolgreich auf meinem Betrieb eingesetzt.[4 bc*; cd**]	0,65 0,95	0,56 1,00	1,10 0,85	0,33 0,99
Mein Berater lehnt Vertragslandwirtschaft nicht ab.[5 ad**; bc*; cd***]	0,98 0,71	0,79 0,80	1,20 0,73	0,45 0,91
Bei meinen Berufskollegen haben Verträge in der Landwirtschaft einen guten Ruf.[5 ad+]	0,18 0,85	0,13 0,73	0,09 0,80	-0,26 0,92
Soziodemographie: Alter Betriebsleiter (in Jahren) [ad**; bd+]	44,9 12,2	42,5 11,5	41,4 11,7	35,9 10,0
Nutzen vertraglicher Zusammenarbeit:				
Erzielung besonders hoher Preise.[4]	-0,24 0,70	-0,44 0,79	-0,23 0,83	-0,33 0,86
Reduzierung von Schwankungen im Unternehmensergebnis.[4 ac**; ad+ ; bc**; cd***]	0,75 0,73	0,67 0,80	1,25 0,81	0,36 0,83
Bewertung vertraglicher Zusammenarbeit:				
Wie beurteilen Sie die Vertragslandwirtschaft insgesamt?[6 ab**; ad***; bc***; cd***]	0,45 0,61	0,07 0,77	0,64 0,57	-0,19 0,62
Die Vertragsldw. ist für die Landwirtschaft von morgen wichtig.[3 ac**; ad**; bc*; cd***]	0,30 0,99	0,07 0,84	0,66 0,91	-0,33 0,86
Bindungsbereitschaft:				
Anteil ldw. Nutzfläche, über die sie Substratlieferverträge abschließen würden?[7 ac**]	19,14 10,34	23,50 19,38	32,27 24,93	24,79 21,79
Optimale Laufzeit eines Substratliefervertrages, über die Liefermenge und Verkaufspreis festgeschrieben werden sollten?[8 ab+/d*]	3,97 1,87	3,13 1,82	4,25 3,25	3,00 1,45

Anmerkungen: n = 201 | [1] Mittelwert | [2] Standardabweichung | [3]Skala: -2 = ‘lehne voll und ganz ab’ bis +2 = ‘stimme voll und ganz ab’ | [4] Skala: -2 = ‘trifft überhaupt nicht zu’ bis +2 = ‘trifft voll und ganz zu’ | [5] Diese Variable wurde umcodiert | [6] Skala: -2 = ‘sehr negativ’ bis +2 = ‘sehr positiv’ | [7] in % | [8] in Jahren |[abcd] Unterschiede der Gruppenmittelwerte anhand Post-Hoc-Tests: ***$p \leq 0{,}001$; **$p \leq 0{,}01$; *$p \leq 0{,}05$; + nicht signifikanter Trend ($p \leq 0{,}10$)

3.6.4.4 Diskussion

Für Biomasseabnehmer bieten die verschiedenen Unternehmertypen die Möglichkeit einer gezielten Einordnung von Landwirten als potenzielle Lieferanten (Marktsegmentierung). Die Identifizierung von Liefersegmenten ist anhand der Unternehmerorientierung und weiterer clusterbeschreibender Größen, wie z.B. des Alters möglich. Hierdurch können Biomassenachfrager interessante Zielgruppen festlegen, bei denen sich eigene Präferenzen mit denen der Landwirte weitestgehend decken – eine Voraussetzung für eine langfristige und erfolgreiche vertragliche Geschäftsbeziehung (vgl. Wiggins & Libecap 1985). Bei der Akquise von Vertragslieferanten sollten Sicherheit suchende (Cluster 1) und risikobereite kooperationswillige Landwirte (Cluster 3) besondere Aufmerksamkeit genießen. Als langfristig bindungsbereite Vertragsbefürworter entsprechen sie der Langfrist- und Supply-Chain-Orientierung von Abnehmern und sind daher gezielt anzusprechen.

In der Regel können Abnehmer nur auf einen begrenzten Pool potenzieller Vertragslieferanten in ihrer Region zurückgreifen. Entsprechend hoch ist ihr Bestreben, die wenigen Landwirte zur vertraglichen Kooperation zu motivieren. Um die Akzeptanz bei Vertragskritikern (Cluster 2 und 4) zu erhöhen, stehen clusterspezifische Informationen zur Verfügung (vgl. Tab. 3-19. Auf dieser Basis können angepasste Akquisitionsmaßnahmen und Vertragsangebote entwickelt werden, um solche Landwirte dennoch als Geschäftspartner zu gewinnen.

Landwirten mit erhöhter Autonomiepräferenz (Cluster 4) sind langfristige Lieferverträge schwierig kommunizierbar. Auf Grundlage ihrer Autonomiepräferenz sollte geprüft werden, ob gegebenenfalls individuelle Vertragskonzepte mit entsprechend kurzen Laufzeiten angeboten werden können. Anlagenbetreiber sollten in geringem Umfang gesonderte kurzfristige Verträge im Sinne einer Portfoliostrategie offerieren. Außerdem ist die Aufnahme großzügiger Kündigungsfristen zu erwägen. Ferner könnten monetäre Anreize gegebenenfalls die Bindungstoleranz erhöhen (vgl. Reise et al. 2012).

Das Risikoprofil der Unternehmer bietet keinen zuverlässigen Ausgangspunkt für eine differenzierte Ansprache von Zulieferern. Der positive zugesprochene Nutzen von Verträgen zum Risikomangement sollte als Argument verstärkter vertraglicher Zusammenarbeit breit kommuniziert werden.

Auf Basis der Ergebnisse sind je nach Unternehmertyp (Cluster 1-4) folgende weitere akzeptanzfördernde Maßnahmen geeignet: Erhöhung der Kooperationsbereitschaft durch z.B. (finanzielle) Einbindung in die Bioenergieerzeugung, Überarbeitung bestehender fixer Vergütungssysteme, Aufbau von Vertragswissen durch entsprechende Schulungsangebote sowie Imagepflege im Berufsstand.

Neben praktischen Empfehlungen für die Rohstoffbeschaffung von Anlagenbetreibern ergeben die Ergebnisse interessante theoretische Schlussfolgerungen für weitere Untersuchungen auf dem Gebiet der Vertragslandwirtschaft, wie z.B. die Relativierung des Risikoprinzips als Vertragsmotiv (s. Granoszewski & Spiller 2013).

Literatur

Benz, M. (2009). Entrepreneurship as a Non-Profit-Seeking Activity. *International Entrepreneurship and Management Journal* 5(1), 23–44.

BFN (Bundesamt für Naturschutz 2010). *Bioenergie und Naturschutz. Synergien fördern, Risiken vermeiden.* Bonn.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) und BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2009). *Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung.* Berlin und Bonn.

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.* Stand Febr. 2017. 45 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=12

Bogetoft, P. & Olesen, H. B. (2002). Ten Rules of Thumb in Contract Design: Lessons from Danish Agriculture. *European Review of Agricultural Economics* 29 (2), 185-204.

Bundesgesetzblatt: Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (2011). *Bundesgesetzblatt Teil 1, Nr. 42, Bonn, S. 1634-1678.* Gesichtet am 30.4.2017: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*%5B@attr_id=%27bgbl111s1633.pdf%27%5D#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl111s1633.pdf%27%5D__1494252151232#

Burgess, L. & Street, D. J. (2005). Optimal designs for choice experiments with asymmetric attributes. *Journal of Statistical Planning and Inference* 134(1), 288-301.

Dautzenberg, K. & Hanf, J. (2008). Biofuel chain development in Germany: Organisation, opportunities, and challenges. *Energy Policy* 36, 485-489.

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2007). *Studie Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow: 3. Aufl.

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2009). *Biogasmessprogramm II – 61 Biogasanlagen imVergleich.* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016). *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2016.* 52 S. Gesichtet am 31.11.2016: http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_20162.pdf

FVB (Fachverband Biogas 2016). *Branchenzahlen 2015 und Prognose der Branchenentwicklung 2016.* 2 S., Gesichtet am 30.4.2017: http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/16-09-23_Biogas_Branchenzahlen-2015_Prognose-2016.pdf

Gebrezgabher, S. A., Meuwissen, M. P. M. & Oude Lansink, A. G. J. M. (2010). Costs of Producing Biogas at Dairy Farms in the Netherlands. *International Journal on Food System Dynamics* 1(1), 26-35.

Gong, Y. & Janssen, M. (2012). From Policy Implementation to Business Process Management: Principles for Creating Flexibility and Agility. *Government Information Quarterly* 29(1), 61-71.

Granoszewski, K. & Spiller, A. (2012). Entscheidungsverhalten von Landwirten bei Investition in die Biogaserzeugung. *Berichte über Landwirtschaft* 90, 284-301.

Granoszewski, K. & Spiller, A. (2013, September). *Vertragliche Zusammenarbeit bei der energetischen Biomasselieferung: Einstellungen und Bindungsbereitschaften von Landwirten*. (Paper presented at the 53. Annual Conference of the German Society of Economic and Social Sciences in Agriculture, Berlin.)

Hensher, D. A., Rose, J. M. & Greene, W. H. (2005). *Applied Choice Analysis – A Primer*. Cambridge: Cambridge University Press.

Herrmann, A. (2013). Biogas Production from Maize: Current State, Challenges and Prospects. 2. Agronomic and Environmental Aspects. *Bioenergy Research* 6(1), 372-387.

Hertwig, R. & Ortmann, A. (2001). Experimental Practices in Economics: A methodological Challenge for Psychologists? *Behavioral and Brain Sciences* 24(3), 383–451.

Hoyos, D. (2010). The State of the Art of Environmental Valuation with Discrete Choice Experiments. *Ecological Economics* 69(8), 1595-1603.

Just, D. R. & Wu, S. Y. (2009). Experimental Economics and the Economics of Contracts. *American Journal of Agricultural Economics* 91(5), 1382-1388.

Kahneman, D. &Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica* 47(2), 263–292.

Keymer, U. (2009). Rentabilität der Biogaserzeugung – Erläuterungen, Übersichten und Musterkalkulationen zum Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG). *Schriftenreihe des Hauptverbandes der landwirtschaftlichen Buchstellen und Sachverständigen*. Sankt Augustin: HLBS Verlag, Heft 183.

KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft 2009). *Faustzahlen Biogas*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. Darmstadt: 2. Auflage.

Lensink, S. & Londo, M. (2010), Assessment of Biofuels Supporting Policies using the BioTrans Model. *Biomass and Bioenergy* 34(2), 218-226.

Levitt, S. D. & List, J. A. (2007). What do Laboratory Experiments Measuring Social Preferences Reveal about the Real World? *Journal of Economic Perspectives* 21(2), 153–174.

Louviere, J. J., Hensher, D. A. & Swait, J. D. (2000). *Stated Choice Methods. Analysis and Application.* Cambridge: Cambridge University Press.

Maron, H., Klemisch, H., & Maron, B. (2011). *Erneuerbare-Energien-Anlagen in der Stromerzeugung.* Köln: Klaus Novy Institut.

Qin, P., Carlsson, F. & Xu, J. (2011). Forest Tenure Reform in China: A Choice Experiment on Farmers Property Rights Preferences. *Land Economics* 87(3), 473-487.

Pennings, J. M. E. & Leuthold, R. M. (2000). The Role of Farmers' Behavioral Attitudes and Heterogeneity in Futures Contracts Usage. *American Journal of Agricultural Economics* 82(4), 908-919.

Reise, C., Liebe, U. & Mußhoff, O. (2012). Präferenzen von Landwirten bei der Gestaltung von Substratlieferverträgen für Biogasanlagen: Ein Choice-Experiment. *German Journal of Agricultural Economics* 61(3), 162-177.

Roe, B. E. & Just, D. R. (2009). Internal and External Validity in Economics Research: Tradeoffs Between Experiments, Field Experiments, Natural Experiments, and Field Data. *American Journal of Agricultural Economics* 91(5), 1266-1271.

Roe, B. E., Sporleder, T. L. & Belleville, B. (2004). Hog Producer Preferences for Marketing Contract Attributes. *American Journal of Agricultural Economics* 86(1), 115-123.

Schmitz, K., Schmitz, P. M. & Wronka, T. C. (2003). Bewertung von Landschafts-funktionen mit Choice Experiments. *German Journal of Agricultural Economics* 52(8), 379-389.

Schulze, B., Spiller, A. & Theuvsen, L. (2007). A broader view on vertical coordination: lessons from German pork production. *Journal of Chain Network Science* 7(1), 35-53.

Selten, R. (1990). Bounded Rationality, *Journal of Institutional and Theoretical Economics* 146(4), 649–658.

Vollrath, B. & Kuhn, W., & Werner, A. (2010). Wildpflanzen für Biogas – Die Zukunft? Veitshöchheimer Berichte 141, Band 2, 33-39. *Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau.* Gesichtet am 30.4.2017: http://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflege/dateien/vhh_berichte_-_2010_-_band_141.pdf

Veetil, V. P. (2011). Conceptions of Rationality in Law and Economics. *European Journal of Law and Economics* 31(2), 199–228.

Walla, C. & Schneeberger, W. (2008). The Optimal Size for Biogas Plants. *Biomass and Bioenergy* 32(6), 551-557.

Wiggins, S. & Libecap, G. (1985). Oil Field Unitization: Commercial Failure in the Presence of Imperfect Information. *American Economic Review* 75(3), 368-385.

3.7 Konsensorientierter Ausbau der Bioenergieerzeugung: Innerlandwirtschaftliche Nutzungskonflikte und betriebliches Entscheidungsverhalten

Karol Granoszewski, Achim Spiller

3.7.1 Problemstellung

Unter den Konversionsformen von Biomasse zu Energie wird der Erzeugung von Biogas eine Schlüsselrolle zugesprochen (Bioökonomierat 2012). Neben der Kraft-Wärme-Kopplung soll die Substitution von Erdgas durch aufbereitetes Biogas (Biomethan) ausgeweitet werden (ibid.). So bestehen Pläne, die Biomethanproduktion bis zu einem Umfang von 10 Mrd. Kubikmeter im Jahr 2030 auszuweiten, welches 10% des heutigen Erdgasverbrauchs entspricht (BMU 2012). Um diese Pläne zu erreichen, bedarf es des Zubaus von etwa 1200 Biomethananlagen, und es müssten zusätzlich 1,2 Mio. ha Ackerfläche für den Energiepflanzenanbau bereitgestellt werden (DENA 2010). Der Zielerreichungsgrad von rd. 4,6% im Jahr 2011 verdeutlicht die Ambitionen im Bereich Biogas (Bundesnetzagentur 2012).

Im Vergleich zu anderen regenerativen Energien handelt es sich bei der Biogasproduktion um ein sehr attraktives Aktionsfeld für Landwirte, da diese über die Biomassebereitstellung hinaus ihre Wertschöpfung durch die Energieerzeugung weiter steigern können (Schaper und Theuvsen 2009). Daher haben Landwirte in den vergangenen Jahren verstärkt Biogasanlagen errichtet. Ein Teil von ihnen hat sich sehr schnell für den Bau entschieden, während sich andere Landwirte (vorerst) gegen eine Investition aussprechen.

Neben den Chancen birgt ein Engagement aber auch Risiken. Vielfach diskutiert wird der hohe Flächenanspruch für die Biomasseerzeugung. Das landwirtschaftliche Flächenpotenzial für den Anbau von Energiepflanzen für die Biogasproduktion in Deutschland wird auf etwa 3-4 Mio. ha von insg. rund 17 Mio. ha landwirtschaftlicher Nutzfläche bis zum Jahr 2030 geschätzt (DBFZ 2011). Von diesem Potenzial ist bereits fast die Hälfte, etwa 1,7 Mio. ha, ausgeschöpft. Die gestiegene Nachfrage nach landwirtschaftlicher Nutzfläche und das begrenzte Flächenangebot haben beachtliche Auswirkungen auf den Produktionsfaktor Boden (Emmann et al. 2013). So sind in weiten Teilen Deutschlands deutliche Preisanstiege auf dem Pachtmarkt für landwirtschaftliche Flächen zu verzeichnen (ibid.). Die zunehmende Flächenkonkurrenz ist problematisch, weil landwirtschaftliche Betriebe im Mittel über einen hohen Anteil an gepachteten Flächen verfügen und infolgedessen besonders anfällig gegenüber Änderungen des Pachtpreises sind. Die Energieerzeugung bringt eine hohe Wertschöpfung mit sich, die bei Biogas erzeugenden Landwirten i. d. R. zu einer höheren Zahlungsbereitschaft für die Flächenpacht gegenüber Nahrungsmittel erzeugenden Berufskollegen führt (Bahrs et al.

2007). Die landwirtschaftlichen Energieproduzenten können sich durch die hohe Subventionierung und die langfristige Erlössicherheit auf dem Pachtmarkt durchsetzen (Heißenhuber et al. 2008).

Es besteht die Vermutung, dass sich solche innerlandwirtschaftlichen Nutzungskonkurrenzen auf die Bereitschaft von Landwirten auswirken, sich an der Energiewende durch eigene Biogaserzeugung zu beteiligen oder die Biogaserzeugung zu akzeptieren. Da Landwirte wichtige Rohstofflieferanten sind, die z. B. Energiepflanzen anbauen, ist der weitere Ausbau der Biogaserzeugung unsicher. Um besser abschätzen zu können, inwieweit die Landwirtschaft bereit ist, eine solche Entwicklung mitzutragen, muss das Entscheidungsverhalten von Landwirten näher betrachtet werden.

Die ökonomischen (z. B. Anstieg der Pachtpreise) und ökologischen Auswirkungen (z. B. Abnahme der Biodiversität durch Energiepflanzen-Monokulturen) der Biogaserzeugung haben zu einer lebhaften Diskussion von Experten aus Forschung und Praxis über die Sinnhaftigkeit der Biogaserzeugung geführt. Die Politik steht vor der Herausforderung, hierauf zu reagieren. Durch die jüngsten Novellierungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) wurden erhebliche Justierungen bei den Anreizmechanismen vorgenommen wurden. Die zahlreichen Novellen des EEG und ihr Einfluss auf die Landwirtschaft zeigen, wie notwendig eine realistische Prognose des landwirtschaftlichen Reaktionsverhaltens ist.

Vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Investitionsverhaltens von Landwirten, der zunehmenden Kritik gegenüber der Biogaserzeugung und des damit drohenden Akzeptanzverlustes sowie der politischen Pläne zur Biogaserzeugung wurden folgende Fragestellungen bearbeitet:

1. Wie nehmen Landwirte die einzelbetrieblichen und regionalen Auswirkungen der Biogaserzeugung wahr, und wie hoch ist die innerlandwirtschaftliche Konfliktgefahr?
2. Welche Bedeutung haben innerlandwirtschaftliche Nutzungskonkurrenzen und andere Faktoren für die Akzeptanz von Landwirten gegenüber der Biogaserzeugung und für ihre Investitionsentscheidung in die Biogasproduktion?

Nicht nur die Politik, sondern auch Entscheidungsträger aus Wirtschaft und Verwaltung stehen vor der Herausforderung, das schwer zugängliche landwirtschaftliche Verhalten einzuschätzen. Ohne eine hinreichend genaue Kenntnis landwirtschaftlicher Anpassungsreaktionen laufen Agrarpolitik und lokale Verwaltungen Gefahr, die Bereitstellung regenerativer Energie aus Biogas zu über- bzw. zu unterschätzen. Solche nicht prognostizierten Boom- bzw. Stagnationsphasen konnten in den letzten Jahren wiederholt beobachtet werden, was zu massiven Planungsproblemen geführt hat. Außerdem müssen sich viele Vertreter von Kommunen und Landkreisen im Rahmen von Energie- und Raumentwicklungsplänen bzgl. der Biogaserzeugung positionieren. Ferner ist ein zunehmendes Interesse von z. B. kommunalen Energieversorgern zu beobachten, ihre Energieerzeugung z. T. auf Biomassebasis umzustellen (Jansen 2012). Eine solche kommunale Energietrans-

formation ist für die Erreichung von Klimaschutzzielen vielversprechend (ibid.). Um Investoren genügend Planungssicherheit zu geben, ist ein besseres Verständnis von Akzeptanz- und Investitionsverhalten landwirtschaftlicher Rohstofferzeuger wichtig.

3.7.2 Methoden

Zunächst wurde eine Literaturanalyse zu innerlandwirtschaftlichen Nutzungskonkurrenzen und -konflikten sowie dem Akzeptanz- und Investitionsverhalten von Landwirten durchgeführt. Darüber hinaus wurden Experten aus der landwirtschaftlichen Praxis wie Berater und Landwirte befragt, um mögliche Auswirkungen der Biogaserzeugung auf den einzelnen Betrieb und die gesamte Landwirtschaft in der Region zu identifizieren. Da Unternehmer nicht nur auf Basis rationaler Fakten, sondern auch aufgrund subjektiver Eindrücke (Wahrnehmung) in ihrem (Entscheidungs-) Verhalten beeinflusst werden (Taggart und Robey 1981), wurden in den Untersuchungen nicht nur gut kalkulierbare Einflussfaktoren wie Kosten betrachtet, sondern in erster Linie verhaltenswissenschaftliche Größen wie Einstellungen und Werte.

Zur Analyse der Konfliktgefahr von Nutzungskonkurrenzen wurden landwirtschaftliche Betriebsleiter mittels Fragebogens persönlich befragt. Hierzu wurden Fragen zu ihren Einstellungen zur Biogaserzeugung, den Auswirkungen auf ihren eigenen Betrieb und auf die Landwirtschaft in ihrer Region gestellt. Aus den erhobenen Daten wurden Nahrungsmittel und Biogas erzeugende Landwirte selektiert und hinsichtlich ihrer Wahrnehmungen miteinander verglichen.

Um des Weiteren die Relevanz von Nutzungskonkurrenzen auf landwirtschaftliches Reaktionsverhalten abzubilden, wurden Modelle zur Akzeptanz- und Investitionsbereitschaft aufgestellt und empirisch überprüft. Das Akzeptanzmodell zeigt, welche Faktoren für die Unterstützung bzw. Ablehnung von Landwirten bezüglich der Errichtung einer von Berufskollegen geplanten Biogasanlage in der Nachbarschaft entscheidend sind. Das Investitionsmodell hat zum Ziel, Einflussfaktoren auf die eigene Investition in die Biogaserzeugung bzw. in die Auswahl einer anderen Form regenerativer Energien zu identifizieren.

Zu möglichen Treibern und Hemmnissen der Unterstützungs- und Investitionsbereitschaft wurden Statements und Fragen entwickelt und von den Probanden mittels 5-stufiger Likert-Skalen (-2 = Ablehnung bis +2 = Zustimmung) bewertet. Schließlich wurden soziodemographische und betriebsstrukturelle Merkmale erhoben.

Im Zeitraum von Ende Juli bis Ende August 2009 wurden 160 landwirtschaftliche Betriebsleiter befragt. Als Befragungsregion wurde Nordwestdeutschland ausgewählt, da in dieser Region eine intensive landwirtschaftliche Produktion (insbes. Schweine- und Geflügelmast) vorherrscht und eine Vielzahl von Biogasanlagen errichtet wurden, so dass starke Nutzungskonkurrenzen vermutet wurden. Die Probanden wurden durch ein „Schneeballsystem“ ausgewählt. Aufgrund zeitlicher und

finanzieller Restriktionen war eine repräsentative Erhebung nicht möglich. Auf Basis des Forschungsmodells wurde allerdings eine gezielte Selektion von drei Probandengruppen angestrebt: (a) Landwirte, die Biogas erzeugen, (b) eine andere Form regenerativer Energien[21] erzeugen oder (c) sich (vorerst) gegen eine Investition aussprechen.

Zwecks Identifizierung von Einflussfaktoren auf die Investitionsbereitschaft wurde eine logistische Regression durchgeführt, bei der die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer der o. a. Gruppen in Abhängigkeit verschiedener Faktoren ermittelt wurde. Die Analyse akzeptanzbildender Faktoren erfolgte anhand eines linearen Regressionsmodells. Hierbei wurde auf Basis der Gesamtstichprobe die Akzeptanz einer geplanten Biogasanlage 5-stufig (Ablehnung bis Befürwortung) in Abhängigkeit verschiedener Faktoren dargestellt. Zur Reduzierung von Messfehlern repräsentieren mehrere Statements in aggregierter Form die Akzeptanz.

Die Befragten bewirtschaften ihren Betrieb vorwiegend im Haupterwerb. Hinsichtlich der Produktionsrichtungen sind sowohl Ackerbauern als auch Veredelungsbetriebe zu ähnlichen Anteilen vertreten. Im Vergleich zum Bundesdurchschnitt sind die Betriebsleiter besser ausgebildet und verfügen über eine höhere landwirtschaftliche Nutzfläche. Im Umkreis von 10 km zu ihrem Betrieb werden im Schnitt rund vier Biogasanlagen betrieben.

3.7.3 Ergebnisse

3.7.3.1 Innerlandwirtschaftliche Nutzungskonkurrenzen und Konfliktgefahr

Landwirte, die weder Biogas noch eine andere Form regenerativer Energien erzeugen (im Folgenden: Nahrungsmittelerzeuger), nehmen infolge expandierender Biogaserzeugung einen verschärften Wettbewerb unter Landwirten wahr (vgl. Tab. 3-20). Dies zeigt sich insbesondere bei dem Anstieg der Pachtpreise für landwirtschaftliche Flächen.

Die Einschätzungen der regionalen Auswirkungen fallen ähnlich aus. Die wettbewerbsverschärfende Wirkung des Biomasseanbaus auf die Tierhaltung sowie den Marktfruchtbau wird von den Nahrungsmittelerzeugern deutlich intensiver wahrgenommen als von den Biogaserzeugern. Beide Gruppen sprechen sich gleichermaßen dafür aus, Rest- und Abfallstoffverwertung stärker politisch zu fördern.

[21] Hierbei handelt es sich vornehmlich um Windkraft- und Photovoltaikanlagen.

Tabelle 3-20: Wahrnehmung von Auswirkungen der Biogaserzeugung

	Nahrungsmittel-erzeuger		**Biogas-erzeuger**		**Gesamt-stichprobe**	
	n = 37		**n = 58**		**n = 160**	
	M	**SD**	**M**	**SD**	**M**	**SD**
Wie stehen Sie zur Bioenergieerzeugung in der Landwirtschaft?[1]***	0,43	0,80	1,38	0,64	0,93	0,84
Wie beurteilen Sie die potenziellen Auswirkungen der sich in Ihrer Region befindlichen Biogasanlagen für Ihren landwirtschaftlichen Betrieb?[3]						
Flächenknappheit.***	0,84	1,34	-0,17	1,18	0,27	1,37
Erhöhung des Pachtpreises.***	0,77	1,28	-0,21	1,26	0,37	1,31
Steigende Futtermittelkosten.*	-0,24	1,25	-0,78	1,00	-0,53	1,14
Probleme mit der Gülleverwertung.***	-0,67	1,24	-1,41	0,73	-1,01	1,10
Zunehmende Konkurrenz zwischen Landwirten.***	0,68	1,14	-0,23	1,02	0,25	1,18
In meiner Region…[2]						
...treiben Biogasanlagen die Pachtpreise in die Höhe.***	1,26	0,82	-0,14	1,07	0,70	1,17
...führen Biogasanalgen zu Problemen bei der Einhaltung von Nährstoffgrenzen.***	-0,16	1,04	-0,87	0,91	-0,39	1,11
Biogasanlagen machen den Nicht-Biogas-Landwirten in meiner Region zu schaffen.***	0,87	0,95	-0,56	1,14	0,21	1,26
Biogasanlagen sind wichtig für meine Region.***	-0,24	1,09	0,59	0,88	0,10	1,06
Der Energiepflanzenanbau in meiner Region führt zu einem erhöhten Wettbewerbsdruck…[2]						
...mit der Tierhaltung.**	0,70	1,37	-0,09	1,25	0,36	1,37
...mit dem Marktfruchtbau.*	0,69	1,14	0,14	1,21	0,54	1,18
Der Staat müsste die Bioenergieerzeugung aus Rest- und Abfallstoffen stärker unterstützen.	1,14	0,80	0,82	1,10	0,97	0,95

Anmerkungen: M=Mittelwert | SD=Standardabweichung | [1]Skala von -2="sehr negativ" bis +2="sehr positiv" | [2]Skala von -2=„lehne voll und ganz ab" bis +2=„stimme voll und ganz zu" | [3]Skala von -2=„sehr gering" bis +2=„sehr groß" | Unterschiede: ***p≤0,001; **p≤0,01; *p≤0,05

3.7.3.2 Akzeptanz von Landwirten gegenüber der Biogaserzeugung

Die Befragten befürworten im Mittel die energetische Nutzung von Biomasse deutlich. Der Nutzungsform Biogas stehen sie trotz der geäußerten Kritik im Schnitt leicht positiv gegenüber (vgl. Tab.3-20). Die generell (noch) positive Reputation der Biogaserzeugung unter Landwirten könnte jedoch angesichts der zunehmenden lokalen Nutzungskonkurrenzen abnehmen. Bei der Planung von Biogasanlagen durch Berufskollegen ist demzufolge mit einer geringen Unterstützung zu rechnen. Dies kann jedoch nur z. T. bestätigt werden (vgl. Abb. 29).

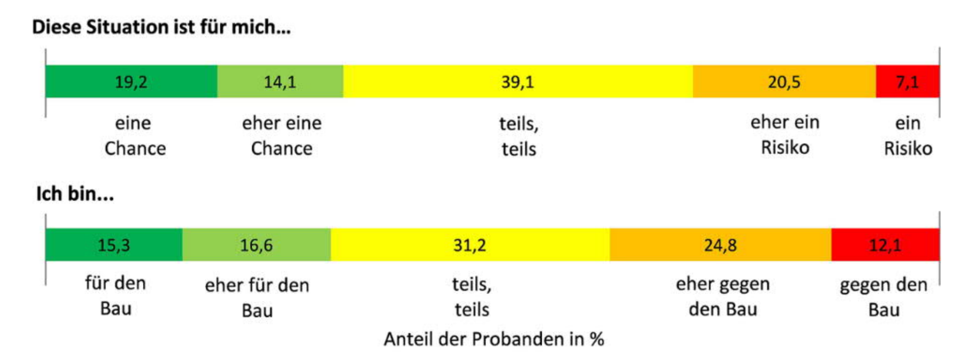


Abbildung 3-29. Reaktionen von Landwirten auf den Bau einer Biogasanlage

Eine deutliche Ablehnung solcher Bauvorhaben durch „betroffene" Landwirte tritt nicht ein. Neben Gefahren, die sich aus der Biogaserzeugung ergeben, sehen Landwirte durch den Bau offensichtlich auch Chancen für ihren eigenen Betrieb. Der hohe Anteil von Unentschlossenen deutet jedoch darauf hin, dass eine klare Positionierung gegenüber der Biogaserzeugung in der Praxis schwerfällt.
Die Befürwortung bzw. Ablehnung der Biogaserzeugung durch Landwirte steht im engen Zusammenhang mit drei Faktoren (vgl. Abb. 3-30).

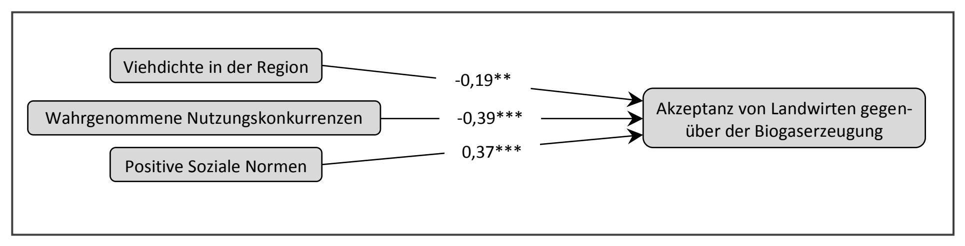


Abbildung 3-30: Reaktionen von Landwirten auf den Bau einer Biogasanlage
Anmerkungen: n=159 | angegeben sind die standardisierten Regressionskoeffizienten: <0=akzeptanzsenkend; >0=akzeptanzsteigernd | Statistische Signifikanz: ***$p \leq 0{,}001$; **$p \leq 0{,}01$ | korr. $R^2=0{,}36$

Werden einzelbetriebliche Auswirkungen der Biogaserzeugung und zunehmende innerlandwirtschaftliche Spannungen stark wahrgenommen, so werden Biogasanlagen eher abgelehnt. Eine ähnlich hohe Wirkung hat das soziale Umfeld von Landwirten. Sind Familie, Berater und Anwohner der Biogaserzeugung gegenüber positiv eingestellt, so trägt dies deutlich zur Akzeptanzbildung bei. Ferner wird deutlich, dass in Regionen mit hoher Tierhaltungsdichte mit geringer landwirtschaftlicher Akzeptanz zu rechnen ist. Andere strukturelle Größen, wie die Anzahl im Umkreis existierender Biogasanlagen oder die eigene Betriebsgröße, stehen in keinem signifikanten Zusammenhang mit der Akzeptanz. Auch persönliche Einstellungen zum Klima- und Umweltschutz, ethische Bedenken gegen den Einsatz von Energiepflanzen sowie das Alter und der Wissensstand des Landwirts im Bereich

Biogas stehen nicht in signifikanter Beziehung zur Akzeptanz. Investitionsbereitschaft von Landwirten in die Biogaserzeugung

3.7.3.3 Investitionsbereitschaft von Landwirten in die Biogaserzeugung

Im nächsten Schritt geht es um die Bedeutung innerlandwirtschaftlicher Nutzungskonkurrenzen für landwirtschaftliche Entscheidungen bzgl. Investitionen in die Biogaserzeugung. Die Ergebnisse des Rechenmodells offenbaren deren Einfluss relativ zu anderen Faktoren. In Abbildung 3-31 ist dargestellt, inwieweit sich das Chancenverhältnis zu einer bestimmten Gruppe (Nahrungsmittel- oder Biogaserzeuger) zu gehören verändert, wenn sich die Ausprägung einer Einflussvariable um eine Einheit erhöht.

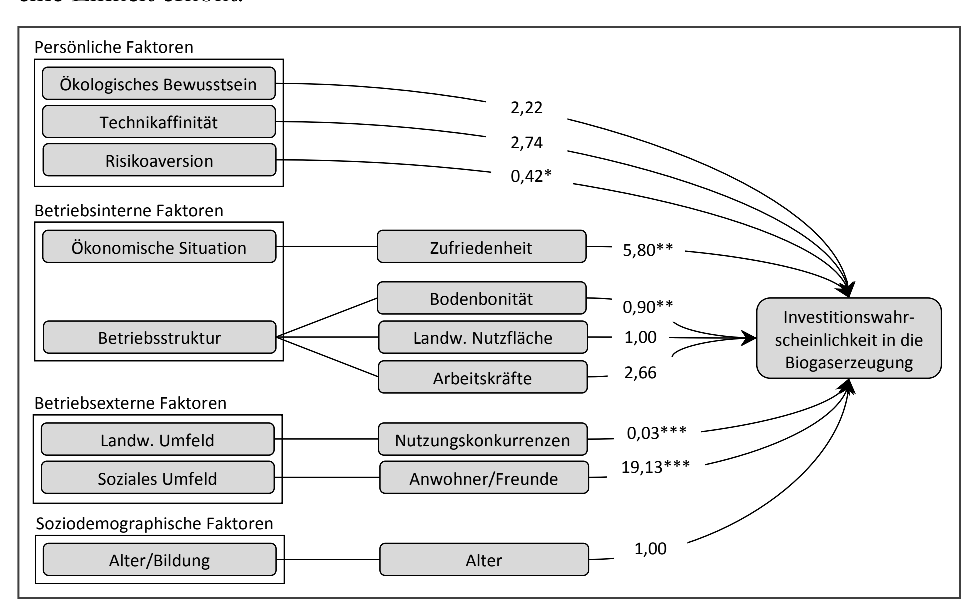


Abbildung 3-31: Einflussfaktoren auf das Investitionsverhalten in die Biogaserzeugung; Anmerkungen: n=85 | angegeben sind die Effektkoeffizienten exp(B): <1=hemmender Einfluss; >1= fördernder Einfluss | Statistische Signifikanz: ***p≤0,001; **p≤0,01; *p≤0,05 | Nagelkerke-R^2=0,82

Bei Betrachtung der Koeffizienten des Modells wird deutlich, dass fünf Faktoren einen signifikanten Einfluss auf die Gruppenzugehörigkeit und damit die Investitionswahrscheinlichkeit haben.

Die Wahrscheinlichkeit sich für die Biogaserzeugung zu entscheiden, wird im erheblichen Ausmaß durch das soziale Umfeld des Landwirts beeinflusst. Sind Anwohner und Freunde der Biogaserzeugung gegenüber positiv gestimmt, so investieren die Landwirte eher. Anders ausgedrückt: Je mehr Freunde und Anwohner von Landwirten Biogasanlagen gutheißen (um eine Einheit auf der Bewertungsskala), desto wahrscheinlicher (um das 19-Fache) ist es, dass ein Landwirt eine Biogas-

anlage errichtet. Den zweitstärksten Einfluss hat die wirtschaftliche Lage des Betriebs. Je wirtschaftlich zufriedener ein Landwirt ist, desto wahrscheinlicher (um das 5,8-fache) investiert dieser.

Weniger investitionsbereit (um das 33,3-fache oder 1/0,03) sind Landwirte hingegen, wenn sie negative Auswirkungen der Biogaserzeugung wahrnehmen. Mit zunehmender Konkurrenz zwischen Landwirten nimmt demnach die Investitionsbereitschaft ab. Investitionen werden ferner abgelehnt, wenn ein Landwirt seiner Selbsteinschätzung nach wenig risikobereit ist. Des Weiteren sind Landwirte tendenziell weniger bereit (um das 1,1-fache) eine Biogasanlage zu errichten, wenn sie über fruchtbare Flächen verfügen. Das Alter der Landwirte, die Betriebsgröße und die Anzahl der Arbeitskräfte auf dem Betrieb sowie Einstellungen zur Umwelt haben keine Bedeutung für einen Einstieg in die Biogaserzeugung.

In einer weiteren Teiluntersuchung wurde überprüft, ob die Investitionsentscheidung von der Technologierichtung abhängt. Tabelle 3-21 ist ähnlich wie Abbildung 3-31 zu lesen. Dargestellt sind die Chancenverhältnisse, sich entweder für die Biogaserzeugung oder für die Erzeugung anderer regenerativer Energien, wie Photovoltaik oder Windenergie (Referenzgruppe), zu entscheiden.

Tabelle 3-21: Einflussfaktoren auf die Technologiewahl

Biogaserzeuger vs. Erzeuger anderer regenerativer Energien[1]		
Ebene	**Faktor**	**exp(B)**
Person	Umweltbewusstsein	0,81
	Technikaffinität	$1,75^{+}$
	Risikoaversion	0,57*
Betrieb	Ökonomische Situation	1,10
	Bodenbonität	0,97*
	Flächenausstattung (ha)	1,00
	Arbeitskräfte	$1,29^{+}$
Extern	Nutzungskonkurrenzen	0,27***
	Sozialer Einfluss	$1,61^{+}$
Anmerkungen: n=107 (Biogaserzeuger=48, Erzeuger anderer Formen regen. Energien=59) | Statistische Signifikanz: ***p≤0,001; **p≤0,01; *p≤0,05; $^{+}$p≤0,10 | [1]Referenzgruppe | Nagelkerke-R^2=0,53		

Stark empfundene Nutzungskonkurrenzen können nicht nur eine Ablehnung von Investitionen zur Folge haben (vgl. Abb. 3-31), sondern auch die Wahl der Technologie beeinflussen. Werden negative Auswirkungen der Biogaserzeugung stärker wahrgenommen, so investieren Landwirte mit einer höheren Wahrscheinlichkeit nicht in die Biogaserzeugung, die als Verursacher hierfür gilt, sondern engagieren sich in anderen Formen regenerativer Energien, welche unter geringerer Kritik stehen. Bei der Technologiewahl ist darüber hinaus ein nicht signifikanter Trend festzustellen, dass technologisch interessierte Landwirte und solche, die über mehr Arbeitskräfte auf ihrem Betrieb verfügen, sich eher für die Biogaserzeugung entscheiden als für andere regenerative Energien.

3.7.4 Diskussion

3.7.4.1 Kernergebnis 1: Innerlandwirtschaftliche Nutzungskonkurrenzen spalten die Landwirtschaft

Während die Biogaserzeugung in der Gesellschaft vorwiegend wegen ihrer ökologischen Auswirkungen wie z. B. Monokulturen kritisiert wird, sind es in der Landwirtschaft eher ökonomische Folgen, die thematisiert werden. Diese werden von Nahrungsmittel und Biogas erzeugenden Betrieben unterschiedlich wahrgenommen. Die Ausweitung der Biogaserzeugung in den vergangenen Jahren hat somit zu deutlichen Spannungen zwischen Landwirten geführt. Dies zeigt sich vor allem in hohen Nutzungskonkurrenzen um den Produktionsfaktor Boden. Der Anstieg des Pachtpreises wird dabei deutlich stärker wahrgenommen, als Preisstatistiken ausweisen (vgl. Breustedt & Habermann 2011). Der innerlandwirtschaftliche Ressourcenkonflikt ist problematisch, weil eine Verdrängung wettbewerbsunterlegener Betriebe nur eingeschränkt möglich ist. Viele landwirtschaftliche Unternehmer sind weniger auf eine kurzfristige betriebliche Rentabilität als auf langfristige Überlebensfähigkeit und Generationenfolgen ausgerichtet. Insofern ist nicht damit zu rechnen, dass wettbewerbsunterlegene Betriebe in der Mehrzahl aus der Produktion treten und die frei werdende Nutzfläche eine Entlastung auf dem Pachtmarkt bewirkt. Weiterhin stehen in der Praxis viele Betriebe in einer Wechselbeziehung zueinander, die an bisherige Produktionsstrukturen gekoppelt ist, wie z. B. die gemeinsame Maschinenanschaffung oder Vermarktungszusammenschlüsse. Ein neuer Betriebszweig Biogas führt zu einer Umstrukturierung betrieblicher Produktionsrichtungen.

Die starke Polarisierung und die „emotional aufgeladene“ Sichtweise auf den Pachtpreis bringen die konkurrenztreibende Wirkung expansiver Biogaserzeugung zum Vorschein. Bei erhöhtem Konkurrenzdruck mit Berufskollegen ist auf langfristige Sicht bezogen die Gefahr des Auftretens von Konflikten gegeben. Die zunehmenden Nutzungskonkurrenzen haben somit nicht nur ökonomische, sondern auch soziale Folgen (Granoszewski et al. 2011). Dies ist besonders dann problematisch, wenn Auseinandersetzungen zwischen Nahrungsmittel- und Biogaserzeugern in Beziehungskonflikte münden, die deutlich komplexer und nur schwer lösbar sind. Insgesamt geht von der Biogaserzeugung somit eine hohe Konfliktgefahr für die Landwirtschaft aus (ibid.). Sie stärkt insgesamt besonders die Bodeneigentümer in Deutschland, die die heimlichen Gewinner der Energiewende sind.

3.7.4.2 Kernergebnis 2: Innerlandwirtschaftliche Nutzungskonkurrenzen führen zu Akzeptanzverlust und sinkenden Investitionsbereitschaften

Die Mehrheit der Landwirte befürwortet grundsätzlich eine Erzeugung von Energie aus Biomasse, was mit hohen Erwartungen an Wertschöpfungs- und Diversifizierungsmöglichkeiten zu erklären ist. Mit auftretenden innerlandwirtschaftlichen Nutzungskonkurrenzen sinkt jedoch ihre Unterstützung gegenüber der unter Kritik stehenden Biogaserzeugung. Insofern droht bei weiter expandierender Biogaserzeugung ein Akzeptanzbruch in der Landwirtschaft. Dass rund ein Drittel der Landwirte den Neubau einer Biogasanlage in ihrer Nachbarschaft befürwortet, zeigt aber auch, dass sich eine Minderheit Vorteile wie z. B. Kooperationsmöglichkeiten durch Substratlieferung oder Anlagenbetrieb erhofft.

Nehmen Landwirte negative Auswirkungen fortschreitender Biogaserzeugung, wie einen erhöhten Wettbewerb um den Boden in ihrer Region wahr, so agieren viele – trotz der ökonomischen Anreize – zurückhaltender bei Investitionen. Sie sind weniger bereit selbst Biogasanlagen zu errichten, um mögliche Konflikte mit Berufskollegen infolge zunehmender Konkurrenz zu vermeiden. Folglich handeln relativ viele Landwirte nicht eigennützig, sondern in dem Bemühen um soziale Verträglichkeit. Ein solch „sozial eingebettetes“ Verhalten (vgl. Granovetter 1985) beeinflusst ökonomische Motive und zeigt die hohe soziale Orientierung von Landwirten. Da in vielen Gebieten bereits ein hohes Konkurrenzniveau herrscht, Landwirte die Auswirkungen der Biogaserzeugung kritisieren und sie gewillt sind, Konflikten aus dem Wege zu gehen, ist abzusehen, dass solidarisches Handeln (Investitionsablehnung bzw. Investition in andere Formen regenerativer Energien wie Photovoltaik oder Windenergie) zukünftig an Relevanz gewinnen wird.

3.7.4.3 Kernergebnis 3: Das dörfliche Kommunikationsnetzwerk trägt entscheidend zur Akzeptanzbildung und zur Aufnahme von Investitionen bei

Es bestehen Wechselwirkungen nicht nur zwischen Landwirten selbst, sondern auch zwischen Landwirten und weiteren Personen ihres direkten sozialen Umfelds. Vor allem die Familie und Freunde, aber auch Beziehungen zu landwirtschaftlichen Beratern und Anwohnern können die Akzeptanz und betriebliche Entscheidungen über Investitionen in die Biogaserzeugung im hohen Maße beeinflussen. Meinungen des sozialen Umfelds haben ein hohes Gewicht in landwirtschaftlichen Beurteilungs- und Entscheidungsprozessen. Insofern handelt es sich nicht um isoliert denkende Entscheider. Landwirten ist es häufig wichtig, der Erwartungshaltung nahe stehender Personen, wie Familie und Freunden, zu entsprechen (soziale Normen).

3.7.4.4 Kernergebnis 4: In die Biogaserzeugung investieren die ökonomisch erfolgreichen und risikobereiten Betriebe

Unbestritten ist, dass Landwirte von ökonomischen Anreizen wie der Vergütung nach dem EEG stark beeinflusst werden. Dies wird offensichtlich, wenn die Vergütungshöhe des EEG in Relation zum Weizenpreis mit der Anzahl errichteter Anlagen verglichen wird (Granoszewski et al. 2012).

Ferner ist die Einschätzung der wirtschaftlichen Lage des Unternehmens entscheidend für die Durchführung von Investitionen in regenerative Energien. Erfolgreiche Betriebe sind nicht wie in der Literatur z. T. vermutet „investitionsträge", sondern investieren gerade dann, wenn sie mit ihrer finanziellen Lage zufrieden sind. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass liquide Betriebe über eine günstige Ausgangslage für kapitalintensive Investitionen wie regenerative Energien verfügen. Sind Landwirte bereit ein hohes Risiko einzugehen, fördert dies die Investition in die Biogaserzeugung. Eine Biogasanlage basiert auf einem biologischen Prozess und ist damit anfällig gegenüber Störungen. Entsprechend bleibt ein unkalkulierbares Restrisiko, welches nur risikobereite Landwirte eingehen. Insgesamt ist die extensive Förderung der Biogasproduktion ein „Konjunkturprogramm" für die Landwirtschaft, welches die Position der ohnehin erfolgreichen Betriebe weiter stärkt.

3.7.4.5 Kernergebnis 5: Fehlende ökologische Motivation

Ökologische Einstellungen von Landwirten haben erstaunlich wenig Bedeutung für ein Engagement in Form von Investitionen in die Biogaserzeugung. In Anbetracht der geführten Klimaschutzdiskussionen handelt es sich hierbei um ein unerwartetes Ergebnis. Dies ist möglicherweise auf die hohe ökonomische Attraktivität in den letzten Jahren zurückzuführen. In den Anfängen der Biogaserzeugung in den 90er Jahren, als die Förderung noch mäßig attraktiv war, waren analog zum ökologischen Landbau viele Biogaspioniere ökologisch motiviert (Trojecka 2007). Mit verbesserten Einspeisetarifen wurden Umweltmotive möglicherweise von Gewinnstreben überlagert bzw. verdrängt.

Ferner ist festzustellen, dass landwirtschaftliche Betriebe außerhalb des Bereichs der ökologischen Landwirtschaft generell sehr skeptisch gegenüber ökologischen Neuerungen eingestellt sind (ibid). Dazu kommt, dass in den vergangenen Jahren sämtliche Unternehmen mit höheren Umweltauflagen konfrontiert wurden.

Insgesamt zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass die Akzeptanz und das Entscheidungsverhalten von Landwirten bzgl. Investitionen wichtige Erfolgsfaktoren beim Ausbau der Biogaserzeugung sind. Dabei berücksichtigen Landwirte ihr berufliches und soziales Umfeld im hohen Maße.

3.7.5 Schlussfolgerungen für die Praxis

Das untersuchte Akzeptanz- und Investitionsverhalten von Landwirten zeigt die hohe Bedeutung von sozioökonomischen Aspekten, wie innerlandwirtschaftlichen Nutzungskonkurrenzen, für den Ausbau der Biogaserzeugung auf. Prognosen, die das Ausbaupotenzial beziffern, basieren zum größten Teil auf einer Analyse vorhandener biologischer Biomasse-Ressourcen. Die Abschätzungen erfolgen auf Basis der Kalkulation von Flächenansprüchen (z. B. Beringer et al. 2011). Als Residualgröße ergibt sich hieraus die mögliche Fläche für den Energiepflanzenanbau. Die große Bandbreite der Potenzialstudien hierzu deutet auf hohe Unsicherheiten hin (vgl. DBFZ 2011). Bisher schließen solche Prognosen das Akzeptanz- und Investitionsverhalten von Landwirten nicht ein. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass *innerlandwirtschaftliche Nutzungskonkurrenzen und -konflikte als Restriktionen ergänzend bei biologischen Biomassepotenzialanalysen* berücksichtigt werden sollten, um präzise Aussagen zu treffen.

3.7.5.1 Schlussfolgerungen für die nationale Politik

Trotz zunehmender Kritik an der Biogaserzeugung (vgl. z. B. WBA 2012) verfolgte die Politik über lange Zeit einen weiteren Ausbau der Energiebereitstellung aus Biogas. Die sinkende Akzeptanz und investitionshemmende Wirkung infolge verstärkter Nutzungskonkurrenzen deutet in Anbetracht weiterwachsender Flächenansprüche unterschiedlicher Nutzungsrichtungen auf eine *Überschätzung des landwirtschaftlichen Beitrags zur Biogasproduktion* hin. Es wurden zu wenige Maßnahmen unternommen, um das innerlandwirtschaftliche Spannungsfeld abbauen.

Erst spät wurden regulative Ansätze verfolgt, welche die direkte Ressourcenkonkurrenz reduzieren. In diesem Zusammenhang ist die Optimierung des EEG relevant, nach dem außer Konkurrenz stehende Biomassen, wie Rest- und Abfallstoffe, besonders gefördert werden. Außerdem ist eine bessere räumliche Verteilung von Biogasanlagen erstrebenswert, um Konzentrationen von Biogasanlagen in bestimmten Regionen zu verhindern. Eine verstärkte Förderung von Rest- und Abfallstoffen, wie z. B. Biomüll oder kommunalem Grünschnitt, hat in diesem Zusammenhang den Vorteil, dass sie räumlich weitestgehend ähnlich verteilt sind. Ferner sollten bei der Genehmigung von Anlagen *stärker Raumordnungsaspekte durch entsprechende Auflagen berücksichtigt* werden. So sind Biogasanlagen in Regionen mit abnehmender Tierhaltung, wie sie z. B. in Ost-Niedersachsen zu finden sind, zu favorisieren.

Für die nationale Politik verdeutlicht weiterhin der fehlende Einfluss ökologischer Motivation, dass sie bei der Umsetzung ihrer ambitionierten Ausbauziele in der Praxis nicht auf innere Motivationen von Landwirten zur umweltfreundlichen Ausgestaltung der Biogaserzeugung setzen kann. Der in der Vergangenheit eingeführte Bonus für die Kraft-Wärme-Nutzung im Rahmen des EEG verdeutlicht dies exemplarisch. Der zusätzliche Anreiz für verstärkte Wärmeauskopplung bei Biogasanlagen hat z. T. dazu geführt, dass ökonomisch erfolgreiche, aber ökolo-

gisch zweifelhafte „Pseudowärmenutzungskonzepte", wie z. B. Holztrocknung, geschaffen wurden. Wenn keine Umweltmotivation vorausgesetzt werden kann, müssen Anreize durch *stringente Umsetzungs- und Kontrollkonzepte* begleitet werden, um nicht Gefahr zu laufen, durch die Kreativität der ökonomischen Akteure ausgehebelt zu werden. Wäre die Kraft-Wärme-Kopplung von Beginn der Förderung verpflichtend gewesen, wären der ökologische Nutzen deutlich höher und einige nachteilige regionale Konzentrationen geringer ausgefallen.

3.7.5.2 Schlussfolgerungen für lokale Akteure aus Politik, Verwaltung, Anlagenplanung und Initiatoren von Bioenergieprojekten

Die Steuerungsfähigkeit der Politik ist begrenzt. Das zeigen die weitreichenden Nutzungskonkurrenzen, die die Politik beim EEG nicht rechtzeitig berücksichtigen konnte. Demzufolge darf die Politik nicht allein auf regulative Maßnahmen setzen. Es sollten Strategien entwickelt werden, die der Akzeptanzsteigerung dienen. Bekannt ist, dass partizipative Ansätze, bei denen verschiedene Akteure eingebunden sind, akzeptanzfördernd wirken (vgl. Kap. 3.8). Eine *gezielte Förderung von gemeinschaftlichen Eigentumsstrukturen* ist aufgrund der hohen sozialen Orientierung auch für den innerlandwirtschaftlichen Bereich erfolgversprechend. So könnten z. B. Biogasanlagen, bei denen eine Vielzahl von Landwirten partizipieren, im Gegensatz zu vereinzelten Anlagen, vermutlich zur Schaffung einer breiten landwirtschaftlichen Unterstützung der Biogaserzeugung in diesen Regionen beitragen. Darüber hinaus bietet sich für Betriebe, die aufgrund ihrer ökonomischen Situation eine eigene Biogasanlage nicht errichten können, die Möglichkeit, sich über einen flexiblen finanziellen Anteil zu beteiligen. Das einzelbetriebliche Risiko könnte hierdurch reduziert werden. Insofern sind auch aus Motivationsgründen solidare Eigentumsstrukturen, wie die einer Genossenschaft, bei der (lokalen) Förderung und Genehmigung von Anlagen zu bevorzugen. Neben der Kooperation von Landwirten *sollte das dörfliche Kommunikationsnetzwerk stärker und breit genutzt werden*. Eine frühzeitige Einbindung der Familien von Landwirten, Anwohnern oder auch landwirtschaftlichen Beratern in Initiierungs- und Planungsphasen von Bioenergievorhaben durch z. B. gemeinsame Workshops könnte helfen, Vorbehalte abzubauen und somit positive soziale Normen schaffen.

Neben normativen und akzeptanzschaffenden Maßnahmen ist eine *frühzeitige Konflikterkennung und -schlichtung notwendig*. In diesem Zusammenhang sollte die landwirtschaftliche Beratung eine Schlüsselrolle als Vermittler zwischen Betrieben einnehmen. Durch sogenannte „dyad to triad"-Strategien sollten neutrale Berater die Kommunikation und den Ausgleich divergierender Nutzungsinteressen sicherstellen und so der Konfliktprävention dienen. Gerade die Bundesländer, in denen es staatliche oder halbstaatliche Beratungsinstitutionen gibt, sollten hier für stärker gemeinwohl- und kooperationsorientierte Beratungskonzepte sorgen.

Im Zuge der Kritik an der Bioenergie werden Forderungen nach einer stärkeren Nachhaltigkeitsorientierung bei der Produktion laut (vgl. WBA 2012). *Quantita-*

tive Ansätze zur Bewertung der Biogaserzeugung sollten um qualitative Aspekte wie innerlandwirtschaftliche Nutzungskonkurrenzen ergänzt werden. In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll, das Konkurrenz- und Konfliktniveau in Regionen mittels standardisierter Landwirtebefragungen zu erfassen und ggf. Grenzen eines regionalen Ausbaus anzupassen.

Akteure aus kommunaler Politik, Verwaltungen und Energieberatung stehen vor der Herausforderung, Raumnutzungs- und Energiepläne zu entwickeln. Vor dem Hintergrund der zunehmenden inner- und außerlandwirtschaftlichen Kritik an Biogas müssen sie eine klare Position bzgl. der Biogasproduktion, wie die Unterstützung oder Ablehnung von Bauvorhaben, einnehmen. Eine Sensibilisierung lokaler Akteure für innerlandwirtschaftliche Nutzungskonflikte kann die oftmals in der Praxis getroffenen Fehleinschätzungen hinsichtlich der regionalen Auswirkungen verstärkter Biogaserzeugung reduzieren und bei der Positionierung von Entscheidern helfen.

Abschließend bleibt zu konstatieren, dass die Biogaserzeugung mittlerweile einen großen Beitrag für die Energiewende leistet. Die Landwirtschaft nimmt hierbei eine tragende Rolle ein. Entsprechend wichtig ist es, die Produktion langfristig durch konsensorientierte Ausgestaltung sicherzustellen. Dies trifft auch für die Weiterentwicklung der Förderung nach dem Auslaufen der 20jährigen Garantiephase zu. Das mit dem EEG 2017 forcierte Ausschreibungsverfahren berücksichtigt soziale und lokale/regionalpolitische Aspekte nur sehr randständig.

Literatur

Bahrs, E., Held, J.-H. & Thiering, J. (2007). *Auswirkungen der Bioenergieproduktion auf die Agrarpolitik sowie auf Anreizstrukturen in der Landwirtschaft.* Diskussionspapier 0705 des Departments für Agrarökonomie und Rurale Enticklung, Georg-August-Universität Göttingen.

Beringer, T., Lucht, W. & Schaphoff, S. (2011). Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *Global Change Biology Bioenergy* 3(4), 299-312.

Bioökonomierat (2012). *Nachhaltige Nutzung von Bioenergie*. Berlin.

Breustedt, G. & Habermann, H. (2011). Einfluss der Biogaserzeugung auf landwirtschaftliche Pachtpreise in Deutschland. *German Journal of Agricultural Economics* 60(2), 85-100.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2012). *Das Integrierte Energie- und Klimaschutzprogramm (IEKP).* Berlin.

Bundesnetzagentur (2012). *Biogas-Monitoringbericht 2012*. Berlin.

Deutsche Energieagentur (DENA) (2010). *Biomethan im KWK- und Wärmemarkt.* Berlin.

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ) (2011). *Global and Regional Spatial Distribution of Biomass Potentials – Status quo and options for specification,* DBFZ Report Nr. 7. Leipzig.

Emmann, C. H., Guenther-Lübbers, W. & Theuvsen, L. (2013). Impacts of Biogas Production on the Production Factors Land and Labour. *International Journal of Food System Dynamics* 4(1), 38-50.

Granoszewski, K., Reise, C., Spiller, A. & Mußhoff, O. (2011). Die Relevanz landwirtschaftlicher Konflikte im Kontext zunehmender Biogaserzeugung. In J. Hambrusch, M. Larcher M., & T. Oedl-Wieser (Hrsg.), *Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie 2011,* S. 129-138. Wien: Facultas.

Granoszewski, K. & Spiller, A. (2012). Entscheidungsverhalten von Landwirten bei Investition in die Biogaserzeugung. *Berichte über Landwirtschaft* 90(2), 284-301.

Granovetter, M. (1985). Economic Action and Social Structure: The Problem of Embeddedness. *American Journal of Sociology* 9(3), 481-510.

Heißenhuber, A., Demmler, M. & Rauh, S. (2008). Auswirkungen der Konkurrenz zwischen Nahrungsmittel- und Bioenergieproduktion auf Landwirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis* 17(2), 23-31.

Jansen, D. (2012). Local Utilities in the German Electricity Market and Their Role in the Diffusion of Innovations in Energy Efficiency and Climate Change Mitigation. In Jansen, D., Ostertag, K. & Walz, R. (Hrsg.): *Sustainability Innovations in the Electricity Sector.* S. 1-26. Heidelberg: Springer.

Schaper, C. & Theuvsen, L. (2009). Der Markt für Bioenergie. *German Journal of Agricultural Economics* 58(1), 91-102.

Taggart, W. & Robey, D. (1981). Minds and Managers: On the Dual Nature of Human Information Processing and Management. *The Academy of Management Review* 6(2), 187-195.

Trojecka, A. E. (2007). *Landwirte als Energiewirte? Bedingungen einer ökologischen Modernisierung der Landwirtschaft am Beispiel der Biogaserzeugung.* Dissertation, Universität Osnabrück.

Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik (WBA) (2012). *Stellungnahme – Förderung der Biogaserzeugung durch das EEG.* Berlin.

3.8 Analyse von Erfolgsfaktoren der dezentralen Bioenergienutzung und Ausbau konsensorientierter integrativer Bioenergieregionen in ausgewählten Landkreisen Niedersachsens

Peter Schmuck, Ines Wilkens & André Wüste

3.8.1 Einleitung

Die bislang vorliegenden systematischen Studien, welche die Frage der Akzeptanz von Bioenergie bei den beteiligten Interessengruppen berühren, beleuchten die gegenwärtig außerordentlich rasanten Entwicklungen nur ansatzweise (Alber 2009; Bahrs und Held 2007; Delshad et al. 2010; Dobo et al. 2007; Eigner-Thiel und Schmuck 2010; Griesen 2010; Jenssen 2010; Jenssen 2011; Keppler 2009; Mangoyana und Smith 2011; Sims und Richards 2004; Domac et al. 2005; Rohracher 2004; Wegener und Kelly 2008; Wüste et al. 2011). Zudem setzen bisherige Forschungsarbeiten eher auf der Mikroebene bzw. an einem konkreten Projekt an. Eine differenzierte Betrachtung der Akzeptanz gegenüber den in Deutschland verwendeten Bioenergiebereitstellungskonzepten erfolgte bisher nicht. Klar hervor geht aus den genannten Studien streng genommen lediglich, dass die Akzeptanz von Bioenergie regional sehr unterschiedlich ist und dass die Thematik einer starken Dynamik unterliegt. Die sozialwissenschaftlichen Determinanten dieser Dynamik sind weitgehend unbekannt (vgl. Cervinka & Schmuck 2010). Eine wachsende Zahl von Investitionsvorhaben im Bioenergiebereich wird daher aufgrund fehlender Akzeptanz verschiedener Akteursgruppen (Anwohner, Naturschutzorganisationen, Landwirte) nicht realisiert oder verläuft ausgesprochen kontrovers. Dies gefährdet die Reputation der Bioenergieerzeugung. Somit bestimmen nicht nur gut vorhersehbare technische und biologische Gegebenheiten das Potenzial der Bioenergieerzeugung in einer Region. Dieses wird vielmehr maßgeblich von der Ausgestaltung der Technologie selbst und dem Diskursverlauf determiniert. Kanning et al. (2009) führen zudem die schwindende Akzeptanz gegenüber Bioenergie darauf zurück, dass zwischen den verschiedenen Bioenergienutzungspfaden nicht ausreichend differenziert wird und sehen darin wichtigen Forschungsbedarf. In diesem Kapitel werden daher Erfolgsfaktoren für die Bioenergienutzung basierend auf differenzierten Erhebungen sowie mögliche Methoden der Aktionsforschung zu deren Umsetzung im Rahmen integrativer Bioenergieregionen vorgestellt. Integrativ bedeutet, dass Bioenergieerzeugung im Einklang mit ökologischen und sozialen Nachhaltigkeitskriterien angestrebt sowie auf eine Vernetzung von Bioenergie mit anderen erneuerbaren Energien abgezielt wird.

3.8.2 Methoden

3.8.2.1 Methoden der Aktionsforschung

Göttinger Ansatz der Nachhaltigkeitswissenschaft

Dieses methodologische Instrumentarium, das in den vergangenen 15 Jahren am Göttinger Interdisziplinären Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE) an der Georg-August-Universität entwickelt wurde, geht von einer doppelten Rolle der WissenschaftlerInnen in Aktionsforschungsprojekten aus. Einerseits werden gemeinsam mit PraxispartnerInnen, welche über Wettbewerbe gewonnen werden, konkrete Aktionen zur Transformation herkömmlicher Lebensstile, in unserem Anwendungsfall der Energieerzeugung und -verteilung geplant und umgesetzt. Zum anderen wird das Vorgehen wissenschaftlich reflektiert und begleitet (Details in Schmuck et al. 2012; 2013; Schmuck 2013).

Planungswerkstätten

Eine Kernmethode der praktischen Arbeit vor Ort sind auf Partizipation verschiedener Interessengruppen und konsensorientierte Planung hin orientierte Werkstätten, die sich verschiedener Elemente der Zukunftswerkstatt (Jungk & Müllert 1997) bedienen.

Best-Practice Reisen

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Verbreitung von Leuchtturm-Projekten besteht nach unseren Analysen in direkten Kontakten mit Initiatoren solcher Projekte vor Ort. Daher wurden mehrere „Best-Practice-Reisen (BPR)“ für aktive PolitikerInnen und BürgerInnen unserer Modelllandkreise organisiert.

MCDA Anwendungen

Multikriterielle Anlaysen (MCDA) sind Methoden aus dem ‚Operations Research‘, die auch zur partizipativen Nachhaltigkeitsbewertung verschiedener Alternativen eines Energiesystems eingesetzt werden können (vgl. Kap. 3.1). Die theoretische Ausgestaltung dieser Methode für den Energie- und auch für den Biomassebereich wurde in einigen Forschungsarbeiten bereits durchgeführt (Oberschmidt 2010; Buchholz et al. 2009; Elghali et al. 2007), die Praxisorientierung dieser Methode und insbesondere die Verbindung mit der Aktionsforschung ist aber noch wenig erforscht (Montibeller 2007) und wurde daher in einer Fallstudie in einem Modelllandkreis untersucht.

3.8.2.2 Methoden der Befragungen

Für alle mündlichen und schriftlichen Befragungen wurden standardisierte Fragebögen bzw. Interviewleitfäden mit geschlossenen und offenen Fragen entwickelt. Die Auswertung der Fragebögen und Interviewtranskripte erfolgte mit statistischen und inhaltsanalytischen Methoden.

Mündliche Befragungen/Leitfadeninterviews und qualitative Textauswertung

Für die Analyse von Erfolgsfaktoren und Hemmnissen beim Ausbau von Bioenergiedörfern wurde ein qualitatives Vorgehen gewählt. Dafür wurde mit je einem Projektinitiator in 25 erfolgreich realisierten Bioenergiedörfern in Deutschland ein problemzentriertes Interview durchgeführt. Weitere zwölf Interviews fanden mit Engagierten aus Bioenergiedorfprojekten im Landkreis Göttingen statt. Die Interviews wurden aufgezeichnet, transkribiert und mit Hilfe der Methode der ‚Grounded Theory' (Strauss & Corbin 1996) ausgewertet.

Schriftliche Befragungen

Des Weiteren wurde anhand einer Fragebogenstudie die Akzeptanz von verschiedenen Bioenergienutzungskonzepten sowie von für die Bioenergiegewinnung potenziell einsetzbaren Rohstoffen untersucht. Die schriftliche Befragung wurde mit 678 Anwohnern des ländlichen Raumes in Deutschland und Österreich durchgeführt. Die größte Stichprobe (n=377) wurde in Regionen erhoben, in denen noch keine Bioenergienutzung realisiert war. Weitere kleinere Teilstichproben wurden in Regionen mit spezifischen Bioenergienutzungskonzepten (industrielle Biogasgroßanlagen, Bioenergiedörfer, Biotreibstoffanlagen, Heizwerke auf Basis von Kurzumtriebsplantagen) erhoben. Kernthemen des Fragebogens waren u. a. die Akzeptanz von Bioenergierohstoffen und -nutzungspfade; Chancen und Risiken der Bioenergienutzung; wahrgenommene Auswirkungen der Bioenergienutzung; Akzeptanz anderer Energieträger.

Eine weitere schriftliche Befragung sollte die Akzeptanz des integrativen Energiepflanzenanbaus untersuchen. Diese Befragung wurde mit allen Haushalten im Dorf des Modellbetriebes in der Region Wolfenbüttel (s. Kap. 3.3) durchgeführt. Im Fokus der Befragung stand die Wahrnehmung und Akzeptanz des Energiepflanzenanbaus seitens der Dorfbevölkerung im Dorf, insbesondere hinsichtlich der alternativen Anbaukonzepte, die in Zusammenarbeit mit der Universität und dem Modellbetrieb realisiert wurden. Kernthemen des Fragebogens waren hier:

- Veränderung des landwirtschaftlichen Landschaftsbildes in der Umgebung des Dorfes mit Begründung;
- Wahrnehmung des Energiepflanzenanbaus in der Umgebung des Dorfes;
- Bewertung verschiedener Anbaukonzepte anhand von Landschaftsbildern mit Begründung;
- Einschätzung des Energiepflanzenanbaus in Deutschland (Likert-Skala);
- positive und negative Argumente bezüglich des Energiepflanzenanbaus in Deutschland;
- Einschätzung des Energiepflanzenanbaus im Dorf (Likert-Skala).

Von 120 verteilten Fragebögen wurden 35 ausgefüllt, was einer Rücklaufquote von 29 % entspricht.

3.8.3 Ergebnisse

3.8.3.1 Aktionsforschung

Göttinger Ansatz der Nachhaltigkeitswissenschaft

Aus unseren Forschungserfahrungen in früheren Projekten wurde als relevantes Themengebiet die regional organisierte Energiewende hin zu erneuerbaren Energien (EE) mit breiter Beteiligung der ansässigen Bevölkerung gewählt. Nachdem die Umstellung der Energieversorgung im Rahmen von „Bioenergiedörfern" (BED) bzw. „EE Kommunen" zum Selbstläufer geworden ist (2013 ca. 140 BED in Deutschland, Schmuck et al. 2013a; Karpenstein und Schmuck 2010; Karpenstein et al. 2013), bestand die neue Herausforderung für uns darin, auf Landkreisebene die Rahmenbedingungen für den regionalen Umbau in Richtung EE gemeinsam mit den auf dieser Ebene Aktiven beispielhaft zu elaborieren. Dafür waren zunächst geeignete Landkreise zu finden. Da sich unser Projektgebiet auf Niedersachsen beschränkt, haben wir die Landräte aller 38 niedersächsischen Landkreise persönlich angeschrieben und eine Zusammenarbeit in unserem Forschungsprojekt offeriert. In 10 an einer Zusammenarbeit mit dem Projektteam interessierten Landkreisen Niedersachsens wurde für interessierte Lokalpolitiker, Landwirte und weitere Interessierte jeweils eine Informationsveranstaltung der Projektgruppe über bereits erfolgreich umgesetzte integrative Bioenergieprojekte in Stadt und Landkreis Göttingen angeboten. Die Landkreise Goslar, Wolfenbüttel und die Region Hannover wurden ausgewählt als diejenigen Regionen, in denen die vielversprechendsten Voraussetzungen für Schritte zur Entwicklung von integrativen Bioenergieregionen vorlagen (Schmuck et al. 2013b). Neben den über die Evaluationen der Teilnehmer von Planungswerkstätten messbaren Sensibilisierungseffekten konnten in der Projektlaufzeit folgende konkreten Entwicklungen angestoßen werden: Im Landkreis Wolfenbüttel wurde die Entwicklung von 2 Kommunen hin zu EE-Kommunen initiiert, in welchen zur Zeit Machbarkeitsstudien gerechnet werden. In dem einen Dorf ist eine zu 100% solar betriebene kommunal betriebene Heizung geplant und in dem anderen ein Satelliten-Blockheizkraftwerk, das von einer bereits bestehenden Biogasanlage in 2 km Entfernung mit Biogas versorgt wird und welches die Heizenergie für das Dorf liefert. Diese Projekte sollen als regionale Leuchttürme die weitere regionale Transformation in Richtung EE in den Landkreisen voranbringen. Für eine Reihe von Projektideen, die in den Werkstätten formuliert worden sind, fanden sich in der Laufzeit des Projektes noch keine geeigneten Konsortien zur Umsetzung. Am Ende der Projektlaufzeit wurde deutlich, dass hauptamtlich agierende EnergiewendemanagerInnen die Prozesse vor Ort beschleunigen und verstetigen können. Daher wurde von PolitikerInnen der Regionen Goslar und Wolfenbüttel beschlossen, eine entsprechende Position für beide Landkreise zu schaffen.

Planungswerkstätten

In den drei ausgewählten Landkreisen wurden Details zu den dort bereits realisierten und in Bau bzw. in Planung befindlichen einzelnen Bioenergieanlagen recherchiert. Ergebnis dieser Analysen sind aktuelle Zustandsbilder zu Potenzialen und Hemmnissen der Bioenergienutzung in den betreffenden drei Landkreisen.

In 32 Round-Table-Strategie-Gesprächen mit dem engeren Kreis der Verantwortlichen in den Landkreisen, in 16 moderierten Planungswerkstätten mit Entscheidungsträgern der Landkreise (Politik, Verwaltung, Landwirtschaft), vier regionsübergreifenden Feld-Führungen sowie 22 Dorfversammlungen und Arbeitsgruppentreffen in den geplanten EE-Kommunen wurden Ansatzpunkte für Bausteine von „integrativen Bioenergieregionen" entwickelt. Gemeinsam wurden Visionen entwickelt und erste Schritte zur Umsetzung konzipiert. Im Landkreis Wolfenbüttel wurde z.B. ein Prozess angestoßen, in dem seit 2011 die Unterstützung mehrerer Dörfer auf dem Weg zu EE-Kommunen politisch unterstützt wird.

Bislang plausibel scheinende Erfolgsfaktoren der Arbeit des Universitäts-Projektteams sind:

- die neutrale und auf breite Partizipation angelegte Moderation durch das Team,
- das Zusammenführen von bislang wenig interagierenden Interessensgruppen in den Werkstätten,
- die Kontakte mit Praktikern und Experten, welche als Impulsreferenten auftraten.

Zum Ende der ersten Phase der Projektlaufzeit wurden die Werkstätten der ersten Phase in einer separaten Befragung der Teilnehmer der Werkstätten evaluiert. Ein wesentliches Ergebnis der standardisierten schriftlichen Befragung von 15 TeilnehmerInnen, die regelmäßig die Werkstätten besucht hatten, ist die positive Beurteilung aller Befragten bezüglich der Wichtigkeit der Werkstätten für die Entwicklung von EE- und Bioenergiekonzepten in der eigenen Region. Auch Dauer, Konzeption, Gruppengröße und –Zusammensetzung wurden positiv bewertet (11 von 15 Einschätzungen).

Best-Practice-Reisen (BPR)

Es fanden BPR in das Bioenergiedorf Barlissen, in die Gemeinde Alheim, in den Landkreis Harz sowie in den Landkreis Steinfurt statt.

Unter den direkt zuordenbaren Resultaten dieser Reisen sind die aktuellen EE-Transformationsprozesse in zwei Dörfern der Region Wolfenbüttel, welche nach einem Beschluss des Landkreises im Anschluss an die Reise gestartet wurde.

Bei einer Reise nach Alheim wurden die etwa 40 Teilnehmer aus den Modellregionen durch den Bürgermeister der Gemeinde begrüßt und über die beispielgebenden Entwicklungen zur EE-Transformation sowie zur Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Gemeinde informiert. Auf einer Rundfahrt durch die Gemeinde wurden Bildungs- und Produktionsstätten für EE-Anlagen sowie kreative Ver-

netzungen von Erzeugung und Nutzung besichtigt, etwa die Produktion von Öko-Eiern auf einem Gelände, in dem kommunale nachführbare PV-Anlagen betrieben werden.

Bei einer Reise in die EE-Region Landkreis Harz nach Dardesheim, an der etwa 25 Teilnehmer unserer Modellregionen teilnahmen, führte der stellvertretende Bürgermeister und Projektinitiator durch einige Teile des Kombikraftwerks Harz. Im Amphitheater am Windpark Druiberg fand zwischen Windrädern mit Blick auf Asse und Kohlekraftwerke eine vom Projektteam organisierte künstlerisch/informative „Ecotainment“-Show zur großen Transformation statt.

Im Juni 2013 fand eine weitere Best-Practice Besuchsfahrt in den Landkreis Steinfurt statt. Hier hat der Umbau zwecks Eigenversorgung mit Erneuerbaren Energien bereits vor einigen Jahren beispielgebend begonnen. Das Amt für Klimaschutz und Nachhaltigkeit hat dort mit mittlerweile 17 Mitarbeitern (davon ca. 6 in der Verwaltung fest angestellt) die Energiewende sowie andere Nachhaltigkeitsthemen auf Landkreisebene seit vielen Jahren strategisch vorangetrieben.

Als Hauptbotschaft dieser Reise war zu erfahren, welche Entwicklungen in einer Region möglich werden, wenn die Landkreispolitik Nachhaltigkeit und Energiewende zur Chefsache macht. Im Gefolge der Fahrt wurde die Beantragung einer Stelle für eine/n KlimamanagerIn in den Landkreisen Goslar und Wolfenbüttel gestartet.

MCDA-Anwendungen

Für dieses Forschungsvorhaben waren zwei MCDA-Anwendungen im Rahmen der Aktionsforschung vorgesehen. Die Suche nach Anwendungen in den Landkreisen wurde durch die Umstellung auf das EEG 2012 erschwert: Die meisten Biogasanlagen wurden schnell noch im Rahmen des EEG 2009 umgesetzt, so dass ein Investitionsstopp in diesem Bereich zu beobachten war. Aus diesem Grund wurde zuerst eine Anwendung außerhalb der Modellregionen geprüft. Hier soll ein Heizkraftwerk auf Basis von holzartiger Biomasse für die Nahwärmeversorgung des Ortskerns gebaut werden. Eine Vielzahl von unterschiedlichen Interessen und die noch fragwürdige Nachhaltigkeit dieses Projektes erschienen für eine Nachhaltigkeitsbewertung mit einer MCDA optimal. Es wurden einige Gespräche, Interviews und eine Ortsversammlung mit reger Teilnahme der Ortsbevölkerung durchgeführt. Letztlich war durch die Projektverantwortlichen die Anzahl von Alternativen aber so eingeengt worden, so dass in dieser Anwendung die Möglichkeiten einer MCDA (inkl. Partizipation der Bevölkerung und anderer Interessensgruppen, gemeinsamer Entscheidungsfindung, Exploration von Vor- und Nachteilen verschiedener Alternativen) nicht hätten genutzt werden können und der Prozess seitens der Universität abgebrochen wurde. Eine vollständige Anwendung des MCDA-Prozesses wurde dann in einem kleinen Dorf (knapp 200 Einwohner) in der Modellregion Wolfenbüttel durchgeführt. In dem Dorf soll eine Nahwärmeversorgung auf Basis von EE zur Verfügung gestellt werden. Das Dorf hat im Jahr 2012 erfolgreich an einem Wettbewerb des Landkreises teilgenommen und gewann

dabei Unterstützung durch das Team der Universität für die Prozessmoderation und einem Ingenieurbüro für die Machbarkeitsstudie. Der Wettbewerb war somit der auslösende Initiator der Bioenergie-Aktivitäten in dem Dorf. Die zur Diskussion stehenden Alternativen waren zu Beginn des Projektes die Etablierung eines Bioenergiedorfes mit eigener Biogasanlage sowie die Nutzung von Biogas oder Nahwärme aus der Biogasanlage des Nachbarortes. Nach einer ersten Prüfung auf Wirtschaftlichkeit wurde die Alternative mit Nahwärme aus dem Nachbarort zurückgesetzt, da sie nicht wirtschaftlich umsetzbar war. Es wurde aber im Rahmen eines seit Beginn 2013 aktiven Arbeitskreises noch die Alternative „Nahwärme aus einem mit Erdgas betriebenen BHKW“ ergänzt. Da die Entscheidung des Ortes zur Umstellung auf Nahwärme auch noch nicht getroffen war, wurde im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung durch die MCDA auch der Status Quo mit Erdgas- und Ölheizungen betrachtet. Da der Prozess in dem Ort bereits gestartet war, mussten sich die MCDA-Elemente (vgl. Kap. 3.1) in die Gegebenheiten einfügen. Der Gesamtprozess ist in Tabelle 3.22 dargestellt. Es konnte aufgrund des Zeitdruckes des Prozesses nur ein MCDA-Workshop durchgeführt werden, eine weitere MCDA-Veranstaltung wurde im Rahmen einer Ortsversammlung zusammen mit der Ergebnispräsentation der Machbarkeitsstudie durchgeführt.

Tabelle 3-19: Einbettung der MADM in den Gesamtprozess der Anwendung in einem Dorf im Landkreis Wolfenbüttel

zeitlicher Ablauf	Vor-Ort-Prozess	Weitere MCDA-Elemente
bis März 2012	Teilnahme an einem Wettbewerb, zur Vorbereitung bereits diverse Treffen und eine Bürgerbefragung	
Jun 12	Dorfbegehung mit Auswahlkommission	
Jul 12	Ortsversammlung: Vorstellung der Bioenergiedorf-Idee	
Jan 13	Ortsversammlung: Verkündigung der Gewinnbotschaft, Gründung der AG	
Jan 13	Erstes AG-Treffen: Diskussion verschiedener Szenarien für das Bioenergiedorf	
Feb/März 13	Wärmebedarfsbefragung durch Ingenieurbüro	
Apr 13	AG-Treffen: Vorstellung des MCDA-Prozesses und Einladung Workshops, Festlegung der Alternativen	Datenerhebung Überarbeitung Indikatorensatz
Apr 13	1. Landwirtetreffen: Informationsveranstaltung	
Mai 13	2. Landwirtetreffen mit Besichtigung einer BGA	
Mai 13	MCDA-Workshop: Kriterien und Gewichtungen	
Jun 13	3. Landwirtetreffen (nur intern): Entscheidung, dass keine eigene BGA gebaut wird	
Jun 13	Gespräch Anlagenbetreiber der BGA und AG-Treffen: Beginn für Machbarkeitsstudie	
Jun 13	Fragebogenaktion: Input für soziale Kriterien	
Aug 13	Ortsversammlung: Ergebnispräsentation der MCDA und der Machbarkeitsstudie > Entscheidung, weiter machen mit Biogaspipeline aus dem Nachbarort	
Sep 13	Gespräch mit Anlagenbetreiber	Dokumentation und Auswertung
	....Prozess läuft weiter.... Elemente des MCDA-Prozesses	

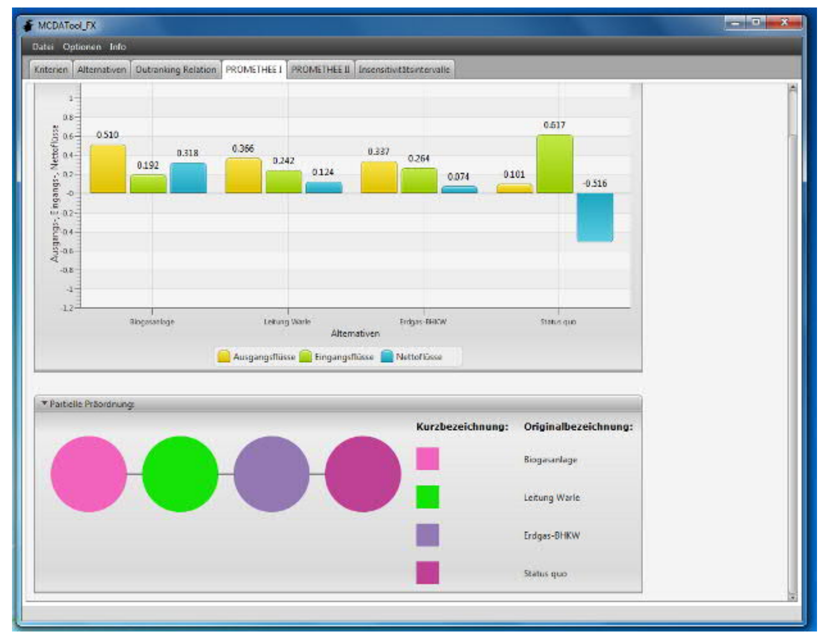


Abbildung 3-32: Ergebnis der Berechnung mit der MCDA-Software

Der Workshop zur Gewichtung der Nachhaltigkeitskriterien wurde mit sieben Teilnehmern der o.g. Arbeitsgruppe durchgeführt. Hier wurden die in diesem Projekt erarbeiteten Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung (vgl. Kap. 1.3.2) vorgestellt, von den Teilnehmern für ihren Kontext ergänzt und anschließend gewichtet. Grundsätzlich bestand eine große Übereinstimmung mit denen von der Universität vorgeschlagenen Kriterien, nur das Kriterium „Attraktivität des Dorfes“ wurde durch die Teilnehmer ergänzt. Bei der Gewichtung lagen die Dimensionen Soziales und Wirtschaft auf dem ersten Platz, gefolgt von den Dimensionen Umwelt und Technik. Die umfangreiche Datenerhebung konnte in einem interdisziplinären Team innerhalb von knapp vier Monaten inklusive einer Befragung der BürgerInnen für die sozialen Kriterien durchgeführt werden. Die zur Anwendung verfügbare Kriterienhierarchie musste nur leicht abgewandelt werden. Die Daten und die Gewichtungen wurden in einer Open-Source-MCDA-Software zusammengeführt (vgl. Abbildung 3-32; s. Kap. 3.1). In einer Ortsversammlung wurden die Ergebnisse (am nachhaltigsten für den Ort wäre eine eigene Biogasanlage, gefolgt von der Biogasnutzung aus dem Nachbarort, dem Erdgasnetz und dem Status Quo) zusammen mit den Ergebnissen der Machbarkeitsstudie des Ingenieurbüros vorgestellt. Da die Entscheidung gegen eine eigene Biogasanlage bereits zwei Monate vorher durch die Landwirte gefallen war, wurde auf der Ortsversammlung beschlossen, das Konzept mit dem Biogas aus dem Nachbarort umzusetzen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie durch das Ingenieurbüro wurden hierzu zwei Varianten mit verschieden großen BHKWs vorgestellt. Basierend auf den bereits

vorhandenen Daten und den Daten des Ingenieurbüros konnte dann in einer erneuten MCDA-Planungsunterstützung die Variante mit dem größeren BHKW als die nachhaltigere für den Ort bestätigt werden.

3.8.3.2 Befragungen

Mündliche Befragungen - Leitfadeninterviews und qualitative Textauswertung: Interviewstudien zu Erfolgsfaktoren und Hemmnissen beim Ausbau von Bioenergiedörfern

Ziel der Interviewstudien war es, die mögliche Bandbreite der Motivationslagen und Initialprozesse, sowie die Erfolgsfaktoren und Hemmnisse für die Umsetzung dezentraler Bioenergieprojekte sozialwissenschaftlich zu analysieren. Die Interviews wurden jeweils mit einer Person durchgeführt, die bei der Initiierung und Umsetzung der Projekte wesentlich beteiligt und engagiert war. Dies waren vor allem Landwirte, Kommunalpolitiker oder Unternehmer.

Ein wichtiger Erfolgsfaktor bei der Umsetzung der Bioenergiedorfprojekte war die Unterstützung von Entscheidungsträgern auf verschiedenen politischen Ebenen, insbesondere auf der Gemeindeebene durch den Bürgermeister bzw. der Gemeindeverwaltung. In einigen Dörfern waren die Bürgermeister meist selbst Initiatoren oder federführend an der Initiierung der kommunalen Energieprojekte beteiligt und erhoben damit das Projekt zur „Chefsache“. Ebenso wurde die Unterstützung auf höherer regionaler Ebene (z.B. Landkreisverwaltung) von den Interviewpartnern als wichtig eingeschätzt.

In diesem Zusammenhang wurden von der Mehrheit der interviewten Personen das Vorhandensein und die Gewinnung von weiteren meinungsbildenden Personen für das Bioenergiedorfprojekt als wesentliche Voraussetzung für die Projektrealisierung hervorgehoben.

Die Interviews zeigten weiterhin, dass die Durchführung von Besuchsfahrten zu bereits erfolgreich realisierten Projekten von zentraler Wichtigkeit sein kann. Bei der Besichtigung von Modellanlagen können die Bürger sich direkt vor Ort mit der Technik beschäftigen und Ideen für das eigene Projekt einholen.

Im Rahmen des Informations- und Kommunikationsprozesses wurde von den interviewten Projektinitiatoren das Prinzip der Transparenz hervorgehoben. Ein transparenter Beteiligungsprozess ist insbesondere bei der Standortwahl der Energieanlagen, bei wirtschaftlichen und finanziellen Aspekten sowie bei auftretenden Schwierigkeiten bei der Realisierung von hoher Bedeutung.

Einige Interviewpartner empfahlen die Durchführung von Einzelgesprächen, insbesondere bei Personen die einem gemeinschaftlichen Bioenergiedorfprojekt skeptisch gegenüberstehen, um deren Kritiken und Bedenken zu erörtern. In einigen Orten wurde für die Erhaltung eine breiten Akzeptanz empfohlen, das Projekt nicht für Parteiinteressen zu mobilisieren.

Als ein wesentliches Hemmnis bei der Realisierung der Bioenergiedörfer stellten sich Unsicherheiten bei der Finanzierung und des wirtschaftlichen Betriebs der Projekte heraus. Dies war einerseits durch Preisentwicklungen auf dem Weltmarkt

sowie andererseits durch widersprüchliche und unklare Aussagen von Fördermittelinstitutionen begründet.

Schriftliche Befragungen - Fragebogenstudie: Akzeptanz unterschiedlicher Formen der Bioenergienutzung

Im Hinblick auf die einzusetzenden Rohstoffe zur Bioenergiegewinnung zeigte die Akzeptanzbefragung zur Bioenergie (N=678), dass vor allem jene Materialen, die zu den Rest- bzw. Abfallstoffen gezählt werden, eine stärkere Befürwortung erfahren als Rohstoffe, die für die Bioenergienutzung extra angebaut werden müssen (vgl. Abbildung 3-33). An erster Stelle sprechen sich ca. 75 % der Befragten für eine Nutzung von Pflegeholz aus der Baum- und Heckenpflege aus. Weiterhin werden von jeweils über 60 % der befragten Personen Gülle, Klärgas, Rasenschnitt, Restholz aus der Forstwirtschaft sowie Bioabfall als mögliche Ausgangsstoffe zur Bioenergiegewinnung befürwortet. Als wichtigste Begründung für die Verwendung dieser Rohstoffe zur Energienutzbarmachung gab die Mehrheit der Befragten an, dass dies eine sinnvolle Abfallverwertungsmöglichkeit sei. Zudem seien diese Rohstoffe ständig vorhanden und müssen nicht eigens für die Energienutzung produziert werden.

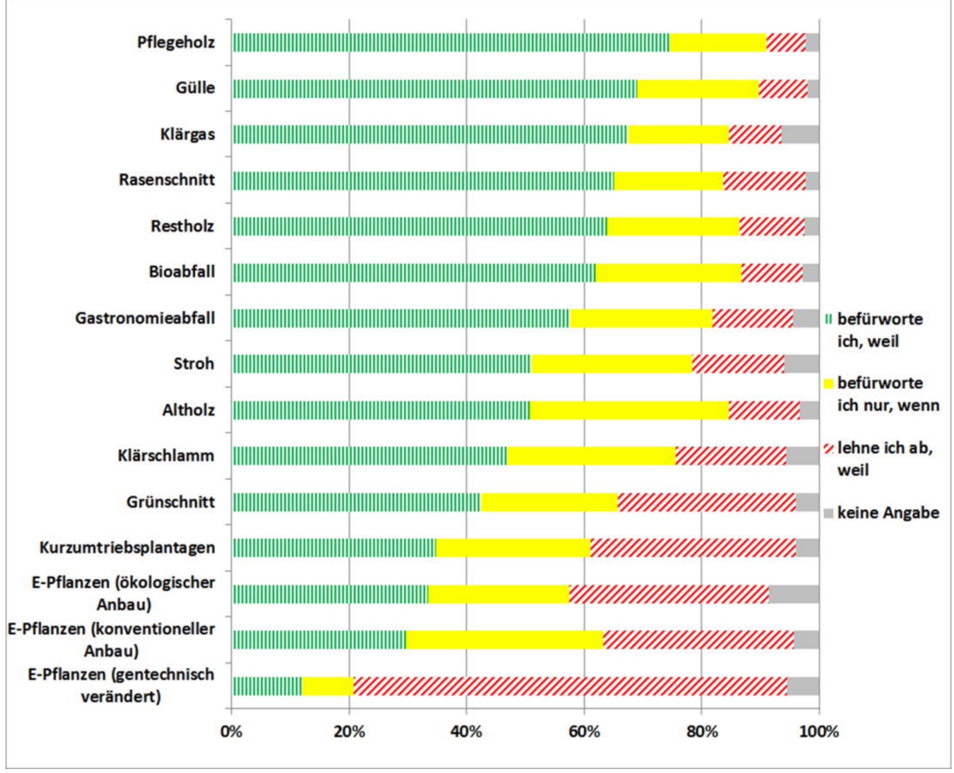


Abbildung 3-33: Bewertung unterschiedlicher Rohstoffe zur Bioenergienutzung (N=678)

Kurzumtriebsplantagen und Energiepflanzen aus ökologischem Anbau werden von jeweils 35 % befürwortet, Energiepflanzen aus konventionellem Anbau werden nur von 29 % der Befragten Personen befürwortet. Das am häufigsten genannte Argument gegen den Anbau von Energiepflanzen ist die Gefahr der Flächenkonkurrenz, insbesondere zum Nahrungsmittelanbau. Des Weiteren wurde die Gefahr von Monokulturen ebenfalls als Grund für die Ablehnung genannt. Auffallend ist die starke Ablehnung von gentechnisch veränderten Energiepflanzen bei 74 % der Befragungsteilnehmer. In diesem Zusammenhang wurde von der Mehrheit der befragten Personen das Argument der unabsehbaren Gefahren im Zusammenhang genmanipulierter Pflanzen angeführt.

Bezüglich der verschiedenen Bioenergienutzungspfade werden insbesondere dezentrale Bioenergieanlagen wie z.B. kleine Biogasanlagen mit Wärmekonzept sowie Heizwerke auf Restholzbasis von den befragten Personen stärker befürwortet als großindustrielle Anlagen zur Bioenergiegewinnung (vgl. Abbildung 3-34). Die Teilstichprobe der industriellen Biogasgroßanlagen umfasst Anlagen bei denen die Energieerzeugung und -verbrauch räumlich getrennt sind (Einspeiseanlage), die keine Koppelproduktion von Strom und Wärme vorweisen können und deren Besitz sich in den Händen von Fremdinvestoren befindet. Die Größe der Anlagen lag über 5 MW. Bei der Teilstichprobe der Bioenergiedorfprojekte handelt es sich um Anlagen, bei denen sich die Energieerzeugung und der Verbrauch unmittelbar beieinander befinden, eine effiziente Koppelproduktion von Wärme und Strom stattfindet und sich der Besitz der Anlagen breit über die Dorfbevölkerung streut. Heizwerke auf Basis von Kurzumtriebsplantagen werden hingegen nur von 33 % der befragten Personen befürwortet. Dies zeigt, dass die Einschätzung der Bioenergieanlagen durch die Befragungsteilnehmer stets unter Berücksichtigung der dazugehörigen Rohstoffe erfolgte. Unter den verschiedenen großindustriellen Biogasanlagen zeigte sich im Hinblick auf die Befürwortung der Anlagen ein ähnliches Ergebnis, sei es zur Einspeisung (39 %), für die Versorgung von Biogastankstellen (35 %) oder zur Stromerzeugung (34 %).

Des Weiteren wurden die Probanden nach möglichen Chancen und Risiken in Verbindung mit der energetischen Nutzung von Biomasse gefragt. Große Chancen bei der Nutzung von Bioenergie sehen die Befragten im Beitrag zur Unabhängigkeit von fossilen und nuklearen Rohstoffen sowie zum Klimaschutz und bei der Nutzbarmachung von Reststoffen. Als ein großes Risiko bei der Bioenergienutzung sehen die Befragten die Flächenkonkurrenz zwischen Nahrungsmittel- und Energiepflanzenanbau. Zudem wurden auch ökologische Bedenken und mögliche negative Veränderungen des Landschaftsbildes durch Bioenergieanlagen und durch Monokultur dominierenden Energiepflanzenanbau genannt.

Ein Mittelwertvergleich zwischen den Teilstichproben ergab zum Teil signifikante Unterschiede im Hinblick auf die wahrgenommenen Auswirkungen einer Bioenergieanlage. Dabei zeigte sich, dass Beeinträchtigungen durch Transportverkehr sowie Geruchsbelästigungen bei den Anwohnern der großindustriellen Biogasgroßanlage stärker wahrgenommen werden als bei den Bewohnern des Bioenergiedorfes.

Ebenso wird die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch den Anbau von Energiepflanzen und durch die Bioenergieanlage weniger stark von Bewohnern des Bioenergiedorfes wahrgenommen, als von Anwohnern einer großindustriellen Biogasanlage.

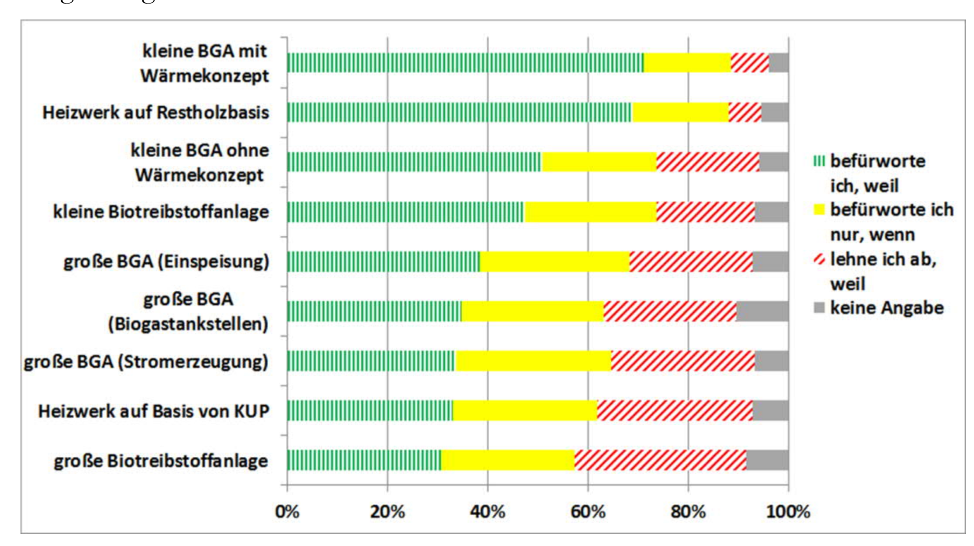


Abbildung 3-34: Bewertung unterschiedlicher Bioenergienutzungspfade (N=678)

Fragebogenstudie: Akzeptanz von Energiepflanzenanbau

Im Fokus der Befragung stand die Wahrnehmung und Akzeptanz des Energiepflanzenanbaus seitens der Bevölkerung im Dorf des Modellbetriebes, insbesondere hinsichtlich der im Rahmen der Aktionsforschung realisierten, alternativen Anbaukonzepte (vgl. Kap. 3.3).

Wie die Abbildung 3-35 zeigt, gibt über die Hälfte der Befragten an, dass sich das landwirtschaftliche Landschaftsbild in der näheren Umgebung während der letzten 20 Jahre überwiegend verschlechtert hat. Dies wird vor allem mit einer Zunahme des Maisanbaus in der Region begründet (16 Nennungen). Ferner werden in diesem Zusammenhang von den befragten Personen die Gefahr von Monokulturen (9 Nennungen), die Verschlechterung der Bodenqualität (2 Nennungen), der Rückgang der Artenvielfalt (2 Nennungen) sowie die Ausbreitung von Wildschweinen genannt (2 Nennungen).

Lediglich fünf Personen haben eine Verbesserung des heutigen Landschaftsbildes im Vergleich zu vor 20 Jahren wahrgenommen. Dies wurde hauptsächlich mit einer vielseitigeren Fruchtfolge (4 Nennungen) begründet.

Im Rahmen der Befragung wurden die Personen gebeten, unterschiedliche Energiepflanzenanbaukonzepte (Maisanbau, Durchwachsene Silphie, Blühpflanzenmischung), die in der Umgebung des Dorfes umgesetzt sind, anhand von Fotos zu bewerten. Die Befragten hatten zudem die Möglichkeit, ihre Antwort zu begründen.

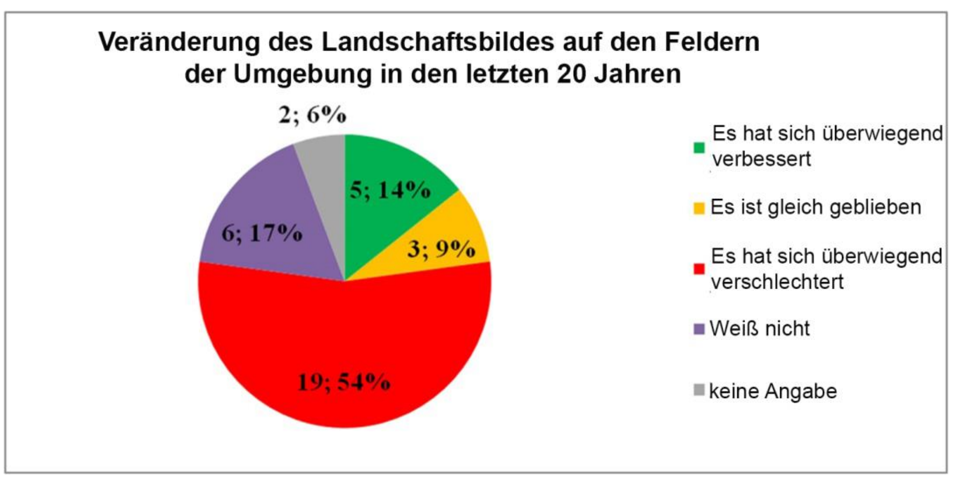


Abbildung 3-35: Veränderungen des Landschaftsbildes (Die ersten Zahlen sind die Nennungen; N=35)

Von fast allen befragten Personen wird die Blühpflanzenmischung positiv bewertet (vgl. Abbildung 3-36). Dabei betonen die Befragten, dass der Anblick eine Bereicherung für das Landschaftsbild sei (10 Nennungen). Weiterhin wird die positive Wirkung auf die Artenvielfalt (6 Nennungen), insbesondere auf Insekten bzw. Bienen (10 Nennungen) genannt. Als einzige negative Begründung wird die Wuchshöhe genannt.

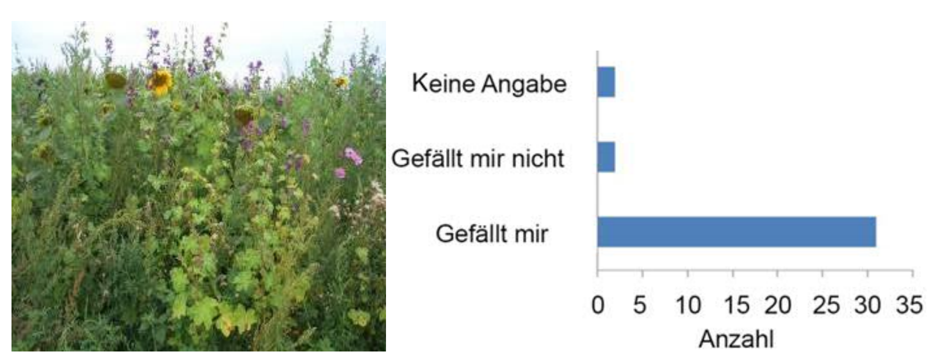


Abbildung 3-36: Bewertung der Blühpflanzenmischung (N=35)

Die Ansicht der Durchwachsenen Silphie wird von 16 Befragten positiv und von acht Befragten negativ eingeschätzt. Auffallend ist, dass 11 Befragte keine Bewertung abgeben konnten (vgl. Abbildung 3-37). Bei den positiven Begründungen heben die Personen hervor, dass sich die Durchwachsene Silphie positiv auf das Landschaftsbild (5 Nennungen) und auf Insekten (4 Nennungen) auswirke. Als häufigste Begründung für die negative Bewertung wird das monotone Aussehen (ähnlich hoch wie Mais) genannt.



Abbildung 3-37: Bewertung der Durchwachsenen Silphie (N=35)

Wie die Abbildung 3-38 zeigt, wird die Maisanbau-Ansicht von den befragten Personen überwiegend negativ (26 Personen) eingeschätzt. Dies wird vor allem mit einer negativen Auswirkung des Maisanbaus auf das Landschaftsbild (18 Nennungen) begründet. Weiterhin werden die Zunahme von Wildschweinpopulationen (7 Nennungen) und die Verschlechterung der Bodenqualität im Zuge des Maisanbaus (2 Nennungen) genannt. Positiv bewertet wird die Maisansicht von 6 Personen. Zwei Personen begründen ihre Einschätzung damit, dass der Maisanbau eine Bereicherung der Fruchtfolge sei.

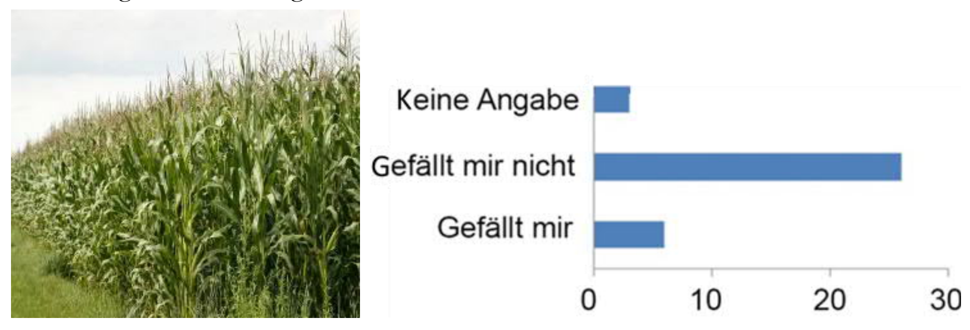


Abbildung 3-38: Bewertung des Maisanbaus (N=35)

3.8.3.3 Diskussion Aktionsforschung

Die Intensität der Zusammenarbeit mit den drei Modellregionen war unterschiedlich: Im Landkreis A stand der Landrat engagiert hinter dem Projekt. Er organisierte gleich aktiv zum Projektstart eine Pressekonferenz. Dies war vermutlich im Rückblick eine wesentliche Bedingung dafür, dass hier starke Unterstützung für unsere Vorschläge und Aktionen zu verzeichnen war, die sich etwa in dem Start des EE-Kommunen-Wettbewerbes im Landkreis äußerte. In den beiden anderen Regionen B und C sahen die politischen Oberhäupter das Projekt zwar als gut an, zeigten aber keinerlei explizite Unterstützung. In der Region B waren aufgrund starker Unterstützung durch NGO-VertreterInnen sowie Verwaltungs-KontaktpartnerInnen dennoch viele Aktivitäten möglich, führten jedoch in der Projektlaufzeit noch nicht zu abrechenbaren konkreten Aktionen. Hier ist zurzeit die

Schaffung einer EE-Regionalmanagement-Personalstelle geplant, welche durch uns inspiriert wurde, und die Umsetzung von Empfehlungen für regionale EE-Projekte wird derzeit geplant. In der Region C war die geringste Resonanz auf unsere Angebote zu verzeichnen. Unsere KontaktpartnerInnen verfügten über zu geringe politische Reichweite, um in den sehr differenzierten und von großen Interessenwidersprüchen geprägten Aktionsfeldern der Region den geplanten Angeboten Rückenwind zu geben. Dazu kam in der Projektlaufzeit ein Wechsel der Zuständigkeit für die Zusammenarbeit mit uns, was die Kontinuität der Arbeit zusätzlich behinderte.

Aus diesen Erfahrungen sowie den Erfahrungen in anderen regionalen EE-Projekten, welche während der Projektlaufzeit aufgesucht wurden, kann geschlossen werden, dass eine notwendige Voraussetzung für eine Transformation in Richtung EE darin besteht, dass sie zur „Chefsache“ erklärt wird. Wenn sich die politische Leitung einer Kommune oder Region zur Transformation bekennt, ist die Verwaltung bereit, entsprechende Beschlüsse und Aktionen zu befürworten. Dies wiederum ist Voraussetzung dafür, dass die engagierten Personen vor Ort, die Pioniere des Wandels aus Wirtschaft und Zivilgesellschaft, die Rahmenbedingungen finden, welche einen gesteuerten, gemeinschaftlich organisierten Umbau der Energieversorgung ermöglichen.

Die Evaluationen der TeilnehmerInnen an den Planungswerkstätten waren durchgängig positiv. Dieser Befund kann kritisch hinterfragt werden, da nur TeilnehmerInnen befragt wurden, welche mindestens zwei Werkstätten besucht hatten (um sicherzustellen, dass den Urteilen eine hinreichend breite Beobachtungsgrundlage verfügbar ist). Damit werden Personen ignoriert, die nur einmal bei Werkstätten waren und möglicherweise die Werkstätten nicht produktiv fanden. Für die Validität der eingeholten Rückmeldungen sprechen allerdings die konkreten Entwicklungen in einzelnen Regionen, die nachweislich auf die gemeinsamen Aktivitäten zurückzuführen sind, wie der EE-Dorf-Wettbewerb in einem Landkreis oder die Einrichtung von Modellbetrieben für integrativen Energiepflanzenbau in den Regionen (s. Kap. 3.3).

3.8.3.4 Multikriterielle Analyse (MCDA)

Die bereits vielfältig in der Literatur beschriebenen Vorteile einer MCDA für einen Entscheidungsprozess (vgl. Wilkens & Schmuck 2012) können durch die Fallstudie bestätigt werden: Strukturierung eines Entscheidungsproblems und der Kommunikation im Prozess, Partizipation der Akteure z. B. durch Gestaltung der Alternativen, Kriterien und Gewichtungen, Lernen der Akteure über ihre und die Präferenzen der anderen involvierten Personen, Darstellung der vielfältigen Auswirkungen eines Projektes etc.. Der Nutzen der Nachhaltigkeitsbewertung für den Prozess im Fallbeispiel wurde auch von den TeilnehmerInnen zwischen „sehr hilfreich“ und „hilfreich“ in einer anschließenden Evaluation eingestuft. Insbesondere ein MCDA-Workshop zur Kriterienfestlegung und deren Gewichtung wurde positiv

aufgenommen, weil die TeilnehmerInnen einen Einblick in die vielfältigen Auswirkungen ihres Vorhabens bekommen haben.

Weiterhin wurden aber auch noch Herausforderungen dieser Methoden bei der Einbindung in einen Praxisprozess gesehen: Der richtige Zeitpunkt für die MCDA-Anwendung ist elementar wichtig, damit die Ergebnisse vorliegen, bevor Entscheidungen im Prozess getroffen werden. Im Fallbeispiel hatten die Landwirte bereits beschlossen, keine eigene Biogasanlage zu bauen, bevor diese Lösung als die Nachhaltigste der Alternativen identifiziert wurde. Daher ist es wichtig, die Methode so früh wie möglich in den Prozess - zum Beispiel im Stadium der Visionsfindung - einzubinden. Für den gesamten Prozess müssen - basierend auf den Erfahrungen des Projektteams - ca. 6 Monate veranschlagt werden. Weiterhin erscheint es elementar für den Erfolg der Methode, dass sie durch eine obere Verwaltungsebene beauftragt wird. Zum einen sind hier am ehesten die finanziellen Mittel für diesen ressourcenintensiven Prozess vorhanden, zum anderen wird dadurch eine Kongruenz im gesamten Prozessablauf gewährleistet, da hier verschiedene Aktivitäten (z.B. MCDA und Machbarkeitsstudie) zusammengeführt werden können (vgl. hierzu Produktsteckbrief „Organisation der Erneuerbare Energien-Transformation auf regionaler Ebene“, Ibendorf 2013). Auch hätte die Beauftragung durch die Verwaltung eine Signalwirkung, die es den Prozessmoderatoren ermöglicht, die relevanten Akteure in den MCDA-Akteurskreis zu integrieren. Hier sollten neben Befürwortern des Vorhabens, auch insbesondere die Kritiker und Betroffenen eingebunden werden, damit eine Konsenslösung gefunden werden kann. Im Fallbeispiel bestand der MCDA-Akteurskreis aus Mitgliedern der bereits bestehenden Arbeitsgruppe, so dass Kritiker des Vorhabens wie z.B. einige der Landwirte nicht in den Bewertungsprozess eingebunden waren.

Eine weitere Herausforderung dieser Methode ist die Datenerhebung und die Datengüte (vgl. Wilkens 2012). Eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung mit mehr als 30 Kriterien bedarf interdisziplinären Expertenwissens und ausreichend Zeit für die Datenerhebung. Unter Praxisbedingungen hat man die Zeit aber nicht, weil der Prozess voranschreitet. Daher könnte man z.B. die Anzahl der Bewertungskriterien reduzieren und dafür eine ungenauere und weniger ganzheitliche Bewertung akzeptieren. Als eine weitere Möglichkeit zur Verringerung des Zeitaufwandes für die Datenerhebung könnten die Kriterien, die schwierig zu erheben sind (z.B. viele der sozialen Kriterien), auf einer beschreibenden Ebene belassen und nicht quantifiziert werden. Bei dieser Vorgehensweise würden diese Kriterien in den Kommunikationsprozess einfließen, aber bei einer rechnerischen Ermittlung der Alternativenreihung außen vor bleiben. Dies wiederum würde aber einen grundlegenden Vorteil der MCDA gegenüber anderen Bewertungsmethoden – die Einbindung von quantitativen und qualitativen Daten - aushebeln, so dass hierzu noch Forschungsbedarf besteht.

Validität der Interviews

Die Durchführung und Auswertung der Interviews orientierte sich an Gütekriterien für die qualitative Forschung (vgl. Mayring 2002). Die Nähe zum Gegenstand ist gewährleistet, da nahezu alle Interviews bei den Interviewpartnern vor Ort durchgeführt wurden. Eine kommunikative Validierung wurde während der Interviews durch gezieltes Nachfragen und Verständnisfragen durchgeführt. Die Verfahrensdokumentation wurde durch die Instrumente des problemzentrierten Interviews gewährleistet. Dem Gütekriterium der Triangulation wird zum einen durch die Beteiligung eines zweiten Interviewers in einigen Fällen Rechnung getragen. Zum anderen wurden die Kodierschemata währen der Interviewanalyse von zwei Forschern unabhängig erstellt und mögliche unterschiedliche Interpretationen im Nachhinein diskutiert.

Validität der Fragebögen

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe standardisierter, schriftlicher Fragebögen ohne den Einfluss eines Interviewers durchgeführt. Bei der Erstellung des Fragebogens wurde auf die gute Verständlichkeit der Fragen geachtet, die nach einem durchgeführten Pretest verbessert wurde. Des Weiteren wurde durch diese Methode ein hoher Grad an Anonymität gewährleistet, indem die Probanden keine Namen angeben mussten und auch die Abgabe der Bögen in einer Weise möglich war, dass die Identität der Befragten nicht transparent wurde. Die Objektivität der Untersuchung kann demnach als gegeben betrachtet werden. Die Beteiligung an der Befragung zur Akzeptanz der verschiedenen Bioenergienutzungskonzepte in den jeweiligen Orten war unterschiedlich. Die Rücklaufquoten lagen zwischen 5 und 39 Prozent. Die z. T. geringen Rücklaufquoten können verschiedene Ursachen haben. Der Umfang und der hohe Anteil an qualitativen (offenen) Fragen könnte einige Befragte überfordert und zum Abbruch der Beantwortung geführt haben. Die Befunde können daher nicht als repräsentativ für die deutschsprachige ländliche Bevölkerung gelten.

3.8.3.5 Folgerungen für künftige Aktionsforschung

Bei künftigen Projekten sollte noch stärker auf Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeiten durch die politische Leitung in Modellregionen geachtet werden. Hier reicht es offenbar nicht, sich auf die Unterschrift von Landräten auf Bewerbungsbögen als Modellregion zu verlassen. Zusätzlich scheinen explizite „Letters of Intent“ mit differenzierten Absichtserklärungen für eine Unterstützung der Aktionsforschungsinhalte zu erwägen zu sein.

Schlussfolgerungen für die Praxis sind in einem gesonderten Dokument dargestellt (siehe Produktsteckbrief „Organisation der Erneuerbare Energien Transformation auf regionaler Ebene“, Ibendorf 2013).

Literatur

Alber, G. (2009). Energieregionen in Österreich. In Keppler, D. Walk, H. Töpfer, E. & Dienel, H.-L. (Hrsg.): *Erneuerbare Energien ausbauen*. S. 131-148. München: Oekom Verlag.

Bahrs E. & Held J. (2007). *Steigende Nachfrage auf den Energie- und Agrarrohstoffmärkten – Konsequenzen für die Niedersächsische Landwirtschaft, die Bodenmärkte und Agrarpolitik*. Studie gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für ländliche Räume, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Buchholz, T., Rametsteiner, E., Volk, T. A. & V. Luzadis, V.A. (2009). Multi criteria analysis for bioenergy systems assessments. *Energy Policy* 37, 484 – 495.

Cervinka, R. & Schmuck, P. (2010). Umweltpsychologie und Nachhaltigkeit [Environmental psychology and sustainability]. In Linneweber, V., Lantermann, E. & Klas, E. (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie, Band Umweltpsychologie*. S. 595-641. Göttingen: Hogrefe.

Delshad, A. B., Raymond, L., Sawicki, V. & Wegener, D. T. (2010). Public attitudes toward political and technological options for biofuels. *Energy Policy* 38, 3414-3425.

Dobó, E., Singh M. & Szücs I. (2007). Global environmental change solutions from biomass, bioenergy and biomaterials: A global overview for sustainable development. *Cereal Research Communications* 35, 349-352.

Domac, J., Richards K. Risovic, S. (2005). Socioeconomic drivers in implementing bioenergy projects. *Biomass & Bioenergy* 28(2), 9-106. Gesichtet am 24.02.2014: http://www.task29.net/assets/files/Domac_Richards_Risovic_2007.pdf

Eigner-Thiel, S. & Schmuck, P. (2010). Gemeinschaftliches Engagement für das Bioenergiedorf Jühnde - Ergebnisse einer Längsschnittstudie zu psychologischen Auswirkungen auf die Dorfbevölkerung. *Zeitschrift für Umweltpsychologie* 14, 98-120.

Elghali, L., Clift, R., Sinclair, P., Panoutsou, C. & Bauen, A. (2007). Developing a sustainability framework for the assesment of bioenergy systems. *Energy Policy, 35,* 6075-6083.

Griesen, M. (2010). Akzeptanz von Biogasanlagen. In: *Bonner Studien zur Wirtschaftssoziologie* 34. Aachen: Shaker Verlag.

Ibendorf, J. (Hrsg.), (2013). *Produktsteckbrief „Organisation der Erneuerbare Energien Transformation auf regionaler Ebene“*. Göttingen: IZNE.

Jenssen, T. (2010). *Einsatz der Bioenergie in Abhängigkeit von der Raum- und Siedlungsstruktur*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Jenssen, T. (2011). Bioenergie – Möglichkeiten und neue Aufgaben für die Raumplanung. In: Bundesamt für Raumordnung und Bauwesen (Hrsg.): *Informationen zur Raumentwicklung* 5, 355-367.

Jungk, R. & Müllert, N. (1997). *Zukunftswerkstätten.* München: Heyne Verlag.

Kanning, H., Buhr, N. & Steinkraus, K. (2009). Erneuerbare Energien – Räumliche Dimensionen, neue Akteurslandschaften und planerische (Mit)Gestaltungs-potenziale am Beispiel des Biogaspfades. *Raumforschung und Raumordnung* 67, 42-156.

Karpenstein-Machan, M. & Schmuck, P. (2010). The bioenergy village in Germany -A lighthouse project for sustainable energy production in rural areas. Osaki, M., Braimoh, A. & Nakagami, K. (Hrsg.): *Local perspectives on bioproduction, ecosystems and humanity.* S. 184-194. Tokyo: United Nations University Press.

Karpenstein-Machan, M., Wüste, A. und Schmuck, P. (2013). Erfolgreiche Umsetzung von Bioenergiedörfern in Deutschland - Was sind die Erfolgsfaktoren? *Berichte über Landwirtschaft* 91, 1-25.

Keppler, D. (2009). Der Ausbau erneuerbarer Energien aus Sicht der Nieder-lausitzer Bürgerinnen und Bürger. In Keppler, D. Walk, H. Töpfer, E. & Dienel, H.-L. (Hrsg.): *Erneuerbare Energien ausbauen.* S. 73-92. München: Oekom.

Mangoyana, R.B. & Smith, T.F. (2011). Decentralised bioenergy systems: A review of opportunities and threats. *Energy Policy* 39, 1286-1295.

Mayring, P. (2002). *Qualitative Sozialforschung.* Weinheim: Beltz Verlag.

Montibeller, G. (2007). *Action-researching MCDA interventions.* In Shaw, D. (Hrsg.), Key-Note Papers, 49th British Operational Research Conference.

Oberschmidt J. (2010). *Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme*. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.

Rohracher H. Bogner, T., Späth, P. & Faber, F. (2004). *Improving the public perception of bioenergy in the EU.* 95 S.

Schmuck, P. (2013). The Göttingen approach of sustainability science: Creating renewable energy communities in Germany and testing a psychological hypothesis. *Umweltpsychologie* 17, 119-135.

Schmuck, P. Eigner-Thiel, S., Karpenstein-Machan, M., Sauer, B., Ruppert, H., Girschner, W. & Roland, F. (2013a). Bioenergy villages in Germany: Applying the Göttingen approach of sustainability science to promote sustainable bioenergy projects. In Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J.: *Sustainable bioenergy production – An integrated approach.* S. 37-74. Springer, Dordrecht.

Schmuck, P., Karpenstein-Machan, M. & Wüste, A. (2013b). Applying sustainability science principles of the Goettingen approach on initiating renewable energy solutions in three German districts. In Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J.: *Sustainable bioenergy production – An integrated approach.* S. 319-338. Springer, Dordrecht.

Schmuck, P., Wueste, A. & Karpenstein-Machan, M. (2012). Initiating and analyzing renewable energy transitions in Germany. In Stremke, S. &

Dobbelsteen, A. (Eds.), *Sustainable energy landscapes: Designing, planning, and development.* S. 335-354. Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis.

Sims, R. & Richards K. (2004). Bioenergy for the global community. *Renewable Energy World* 7, 128-133.

Strauss, A. & Corbin, J. (1996). *Grounded Theory: Grundlagen Qualitativer Sozialforschung.* Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union.

Wegener, D. & Kelly, J. (2008). Social psychological dimensions of bioenergy development and public acceptance. *Bioenergy Research* 1, 107-117.

Wilkens, I. (2012). *Multikriterielle Analyse zur Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen – Von der Theorie zur praktischen Anwendung.* Dissertation TU Berlin, 215 S., Gesichtet am 30.4.2017: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/3682/1/Dokument_1.pdf

Wilkens, I. & Schmuck, P. (2012). Transdisciplinary evaluations of energy scenarios for a German village using multi criteria decision analysis. *Sustainability* 4, 604-629.

Witzel, A. (2000). Das problemzentrierte Interview. *Forum Qualitative Sozialforschung Band 1(1),* Gesichtet am 30.4.2017: http://www.qualitative-research.net/index.php/fqs/article/view/1132/2519

Wüste, A., Schmuck, P., Eigner-Thiel, S., Ruppert, H., Karpenstein-Machan, M. & Sauer, B. (2011). Gesellschaftliche Akzeptanz von kommunalen Bioenergie-projekten im ländlichen Raum am Beispiel potenzieller Bioenergiedörfer im Landkreis Göttingen. *Zeitschrift für Umweltpsychologie* 15, 135-151.

3.9 Planung einer Biomasse-gestützten Wärmeversorgung auf der Basis von Nahwärmenetzen

Anke Daub, Nico Michalak, Folker Roland, Volker Ruwisch

3.9.1 Einleitung

Bei der Umstellung der Energieversorgung auf Erneuerbare Energien steht der Strombereich im Vordergrund der öffentlichen Diskussion. Entsprechend wird häufig über Windkraft- und Photovoltaikanlagen, aber selten über Scheitholz, Pellets für Nahwärme gesprochen, obwohl diese ähnlich viel Endenergie liefern wie die erneuerbaren Stromlieferanten (Abb. 39 unten). Wie Abbildung 3-39 (oben) verdeutlicht, ist aber gerade der Wärme-/Kältebereich für den größten Anteil des Endenergieverbrauchs verantwortlich, wobei der Kälteanteil sehr gering ist.

Um schnelle Fortschritte beim Aufbau einer nachhaltigen, klimaschonenden Energieversorgung zu erreichen, ist es deshalb sinnvoll, die Wärmeversorgung stärker in den Blick zu nehmen, zumal die hierfür notwendigen Techniken seit langem bekannt und im Einsatz sind (s. Anstieg in Abb. 3-39 unten).

Der Anteil der Erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch betrug im Jahr 2016 ca. 14,8 %, davon stellte die Bioenergie ca. 59 % bereit (s. auch Kap. 1.3.1 und Tab. 1.2). Trotz dieses bereits hohen Anteils sind die Potenziale der Bioenergie noch nicht ausgeschöpft. Nach Berechnungen der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. könnte im Jahr 2050 allein der Bioenergieanteil ca. 26 % der gesamten Energieversorgung (Strom, Wärme, Kraftstoffe) in Deutschland übernehmen (FNR 2016), wenn der Energiebedarf halbiert werden könnte.

Die Bioenergie dominiert in Deutschland vor allem im Wärme/Kälte- und Kraftstoffbereich. In Bezug auf die Wärme/Kälte betrug der Anteil der Erneuerbaren Energien 2016 insgesamt 13,4 %, wovon die Bioenergie mit 11,8 % den Großteil bereitstellt (BMWi 2017; s. auch Tab. 1.2). Zum Vergleich: In Jahr 1990 betrug der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Wärme-/Kälteversorgung nur 2,1 %, wovon 2,0 % aus der Biomasse stammte (s. Abb. 3-39; BMWi 2017).

Wärme fällt auch als Kuppelprodukt bei der Stromproduktion an, wird aber oft nicht genutzt. Das zeigen z. B. die großen Kühltürme von Atom- und Kohlekraftwerken, durch die die anfallende Wärme an die Atmosphäre abgegeben wird. Trotz dieser Verschwendung von Wärme werden auch in der Nähe solcher Kraftwerke weitere, häufig fossile Energieträger in Heizkesseln verbrannt, um Raumwärme zu erzeugen. Vor dem Hintergrund der begrenzten Verfügbarkeit der fossilen Energieträger und des bereits stattfindenden Klimawandels ist dieser Zustand nur wenig effizient und unakzeptabel.

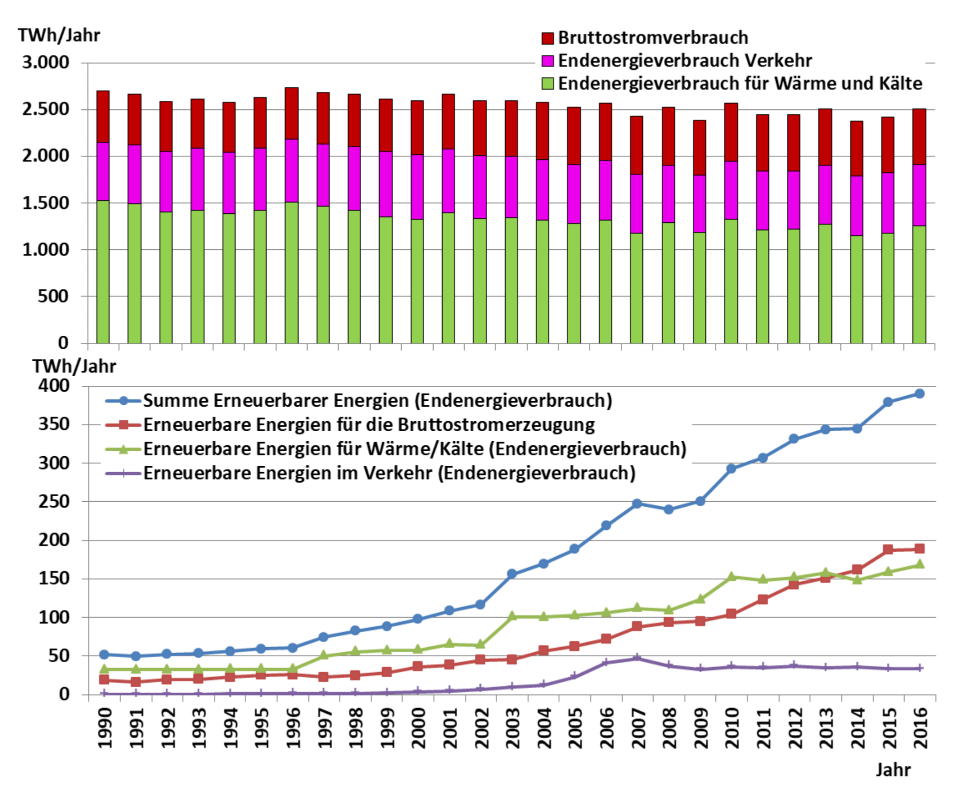


Abbildung 3-39 oben: Kumulierte jährliche Anteile von Wärme, Kraftstoff und Strom am Endenergieverbrauch in Deutschland basierend auf allen Energieträgern; unten: Zeitlicher Verlauf der jährlichen Produktion an Strom, Wärme/Kälte und Kraftstoff aus erneuerbaren Energieträgern in Deutschland (Angaben in Terawattstunden pro Jahr; nach Daten des BMWi 2017)

Demgegenüber ist es oftmals sinnvoller und wünschenswert, mit Erneuerbaren Energien dezentral Strom zu erzeugen und die hierbei meist zwangsläufig auch anfallende Wärme direkt für Heizzwecke zu nutzen. Dieser Ansatz wird z. B. in Bioenergiedörfern umgesetzt und hat dort innerhalb von wenigen Jahren zu einem deutlichen Rückgang des Bedarfs an fossilen Energieträgern geführt und dadurch zu einer Reduzierung der CO_2-Emissionen pro Kopf um häufig mehr als 50%. Der in Bioenergiedörfern notwendige Schritt zu einer Dorfzentralheizung setzt voraus, dass die an den Bioenergieanlagen bei der Stromproduktion anfallende bzw. durch die Verbrennung von Holzhackschnitzeln oder Biogas zusätzlich erzeugte Wärme im Ort mit Hilfe eines Nahwärmenetzes verteilt werden kann. Die Wettbewerbsfähigkeit dieser Wärmeversorgung hängt in großem Maße davon ab, ob sich ein solches Nahwärmenetz wirtschaftlich umsetzen und betreiben lässt. Dies gilt umso mehr für Biogasanlagen, die nach der Novellierung des EEG zum 01.01.2012 in Betrieb gegangen sind, da der Gesetzgeber für diese eine 60%ige Nutzung der

Wärme vorgeschrieben hat, wenn eine Vergütung des Stroms nach dem EEG angestrebt wird (EEG 2012).

In den folgenden Abschnitten wird ein eigens entwickeltes Entscheidungsmodell für die Wärmedistribution erläutert, auf eine reale Planungssituation angewendet und validiert. Dieses Modell unterstützt die Planung derartiger Versorgungskonzepte mit dem Ziel, wirtschaftliche Netze, evtl. auch Teilnetze, in Bioenergiedörfern zu identifizieren, um damit eine energieeffiziente und klimaschonende Wärmeversorgung für die Bewohner zu ermöglichen.

Nahwärmenetze in Bioenergiedörfern stehen oft vor dem Problem, dass die Wärmeabnehmer räumlich stark verteilt und damit die Kosten der Wärmeverteilung pro Anschluss relativ hoch sind. Aus diesem Grund kann es bei einer überörtlichen Betrachtung gegebenenfalls wirtschaftlicher sein[22], die Wärme nicht (nur) am Ort der Bioenergieanlage, sondern auch überörtlich zu nutzen. Gibt es in der Nähe der Bioenergieanlage z. B. ein Schulzentrum, ein Schwimmbad oder ein Industriegebiet, dann könnten diese alternativ oder zusätzlich zum Bioenergiedorf und aufgrund des punktuell hohen Wärmebedarfs zu insgesamt geringeren Kosten mit Wärme versorgt werden. In den folgenden Abschnitten wird dazu für eine Beispielregion eine entsprechende Planungssituation beschrieben, für die mit Hilfe eines Entscheidungsmodells ein Lösungsvorschlag für ein regionales Wärmeversorgungskonzept (Produktions- und Distributionssystem) entwickelt wird.

Die Modellbeschreibung findet sowohl bei der örtlichen als auch der überörtlichen Planung aus der Sicht eines potenziellen Nahwärmenetzbetreibers statt, für den z. B. Landwirte (als Biogasanlagenbetreiber) Wärmelieferanten und Haushalte (als Wärmeabnehmer) Kunden sind.

3.9.2 Beschreibung des Entscheidungsmodells

Neben der Energieeffizienz stellt die Wirtschaftlichkeit als ökonomisches Kriterium eine wesentliche Voraussetzung dar, um eine Biomasse-gestützte Wärmeversorgung im Rahmen von Bioenergieprojekten realisieren zu können. Das bedeutet, dass bei der Planung und Ausgestaltung eines Nahwärmenetzes einerseits die Produktionskapazitäten richtig dimensioniert sein sollten und andererseits bei der Auswahl der anzuschließenden Hausobjekte sowie der zu verlegenden Leitungsteilstücke wirtschaftliche Ineffizienzen vermieden werden sollten.

In Dörfern mit relativ stark vernetzten Straßen und verteilten potenziellen Anschlussobjekten lässt sich eine solche Planung nur noch bedingt manuell durchführen. Es bietet sich vielmehr an, Planungs- und Entscheidungsmodelle, verbunden mit geeigneten Lösungsansätzen, zu verwenden, um ein optimales Wärmeversorgungskonzept identifizieren zu können. Mit Hilfe solcher Modelle werden die realen Gegebenheiten auf ihre wesentlichen Strukturen reduziert abgebildet (z. B.

[22] Dies korrespondiert mit dem volkswirtschaftlichen Ziel einer pareto-optimalen Allokation knapper Produktionsfaktoren und Güter; vgl. Sohmen, E. (1976).

Hausobjekte als Knoten und Leitungsteilstücke als Kanten eines Graphen), so dass die Interdependenzen zwischen den einzelnen Komponenten einer komplexen Entscheidungssituation deutlich werden, sich unterschiedliche Lösungsvorschläge bewerten lassen und die Auswirkungen von Datenänderungen zeitnah berechnet werden können. Von den verschiedenen Ausgestaltungsmöglichkeiten bietet sich im vorliegenden Fall ein Optimierungsmodell an, das dadurch gekennzeichnet ist, dass aus einer Gruppe möglicher Lösungen diejenige ausgewählt wird, mit der das verfolgte Ziel bestmöglich erreicht wird.

Ein Optimierungsmodell, wie es auch hier zur Anwendung kommt, umfasst in der Regel drei Komponenten:

- *Entscheidungsvariablen*: Sie repräsentieren die Handlungsoptionen, d. h. die möglichen Alternativen, über die entschieden werden kann/muss (z. B. Verlegung eines bestimmten Leitungsteilstücks).
- *Zielfunktion*: Sie gibt Auskunft über das Beurteilungskriterium, anhand dessen ein Lösungsvorschlag bewertet wird, sowie die Verbesserungsrichtung (z. B. Maximierung des Kapitalwerts).
- *Nebenbedingungen*: Sie schränken das Entscheidungsfeld ein, indem Handlungsoptionen, die sich real nicht umsetzen lassen, im Vorfeld ausgeschlossen werden (z. B. Verwendung von nicht mehr als der verfügbaren Biomasse oder Verkauf von Wärme an einen Haushalt nur dann, wenn dieser auch an das Leitungsnetz angeschlossen wird).

Für die Formulierung eines Optimierungsmodells zur Planung eines Nahwärmenetzes in einem Dorf sollen die genannten Komponenten im Folgenden konkretisiert werden.

Mit Blick auf die beiden Fragen „Wer soll an das Nahwärmenetz angeschlossen werden?“ und „Wie soll das Netz verlaufen?“ lassen sich die erforderlichen *Variablen* in zwei Gruppen unterteilen: Einerseits ist in Bezug auf das Leitungsnetz zu entscheiden, an welchen Stellen Leitungen verlegt werden sollen. Hierzu sind für alle möglichen Netzteilstücke (Kanten) Variablen zu definieren, die den Wert 0 (das Teilstück wird nicht verlegt) oder 1 (das Stück wird Bestandteil des Nahwärmenetzes) annehmen können. Die Variablen selbst bzw. die durch sie repräsentierten Kanten werden über die jeweiligen Anfangs- und Endpunkte (Knoten) definiert. Da zwischen diesen beiden Knoten beide Fließrichtungen möglich sind, müssen aus modelltechnischen Gründen jeder Kante zwei Variablen zugeordnet werden.

Andererseits ist über die Anschlussobjekte (Knoten) selbst zu entscheiden, denn nicht alle Interessenten werden automatisch an das Netz angeschlossen (ein zu geringer Wärmebedarf oder zu hohe Anschlusskosten könnten dagegensprechen). Als weitere Knoten (und damit Variablen) sind noch Kreuzungspunkte des Wärmenetzes zu nennen, die aus modelltechnischen Gründen zur Beschreibung

des Netzes notwendig sein können. Auch die den Knoten zuzuordnenden Variablen sind binär und beschreiben eine ja/nein-Entscheidung.

In der *Zielfunktion* wird als Zielgröße zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Nahwärmenetzes der Kapitalwert herangezogen (Uhlemair 2012). Sollte er für ein vorgeschlagenes Nahwärmenetz einen positiven Wert aufweisen, so bedeutet dies, dass eine Investition in Form des geplanten Wärmenutzungskonzepts wirtschaftlich vorteilhaft ist und damit rentabler als eine vergleichbare Geldanlage bei einem Finanzinstitut. In den Kapitalwert fließen alle mit dem Aufbau des Netzes, dem Anschluss der Wärmenachfrager und dem Verkauf der Wärme verbundenen Ein- und Auszahlungen ein.[23] Er repräsentiert deren Wert zu Beginn des Projektes und umfasst die Summe der auf diesen Zeitpunkt abgezinsten Zahlungen.[24]

Dieser Kapitalwert des Projekts setzt sich in der Zielfunktion aus den Kapitalwerten der verschiedenen Komponenten des Nahwärmenetzes zusammen: So wird für die einzelnen potenziellen Anschlussobjekte jeweils ihr spezifischer Kapitalwert ermittelt, indem die mit ihrer Einbeziehung in das Netz verbundenen Ein- und Auszahlungen (z. B. Einzahlungen aus dem Wärmeverkauf oder Auszahlungen für den unmittelbaren Hausanschluss) auf der Basis der relevanten Daten (z. B. die Wärmenachfrage des jeweiligen Haushalts) erfasst und herangezogen werden. Die Kapitalwerte der Netzteilstücke ergeben sich unter Berücksichtigung beispielsweise ihrer Länge und des Kostensatzes, der für das Verlegen eines Meters Leitungsstück anfällt. Die Höhe dieses Kostensatzes hängt unter anderem davon ab, ob das Teilstück auf einem unbebauten Grundstück, einer Dorfstraße oder einer Bundesstraße verlegt wird.

Um sicherzustellen, dass das Netz vollständig ist (d. h. ohne Unterbrechungen und mit einer Anbindung an die Biogasanlage als Wärmequelle) und Haushalte nur dann Teil dieses Netzes werden, wenn auch ihr Anschluss an das Leitungssystem vorgesehen ist, sind entsprechende Nebenbedingungen zu formulieren. Sie gewährleisten die Umsetzbarkeit des vorgeschlagenen Nahwärmenetzes.[25]

Auf der Basis des so beschriebenen Modells lässt sich dann unter Anwendung geeigneter Software zur mathematischen Optimierung ein Ergebnis ermitteln, dessen Kapitalwert den maximal erreichbaren für die vorliegende Datenkonstellation darstellt. Um diese mathematische Lösung auf die reale Planungssituation zu transferieren, sind die ausgewiesenen Lösungswerte entsprechend zu interpretieren. Diejenigen der Kantenvariablen, die den Wert 1 aufweisen, zeigen an, dass das entsprechende Leitungsteilstück zu realisieren ist, so dass letztendlich ein vollständiges Nahwärmenetz entsteht. Aus den den Knoten zugeordneten Variablen sind

[23] Ggf. sind auch die mit dem Bau und Betrieb der Biogasanlage bzw. der Heizzentrale verbundenen Zahlungsströme zu berücksichtigen, die dann nicht relevant sind, wenn beispielsweise ein Landwirt die Anlage betreibt und die anfallende Wärme zu einem festgelegten Preis an den Netzbetreiber verkauft.

[24] Zur Bedeutung des Kapitalwerts und zur Kapitalwertmethode vgl. Götze (2014, S. 78ff)

[25] Zur konkreten mathematischen Formulierung des beschriebenen Entscheidungsproblems als lineares Optimierungsmodell vgl. Daub et al. (2013, S. 227ff)

ebenfalls diejenigen auszuwählen, für die ein Wert von 1 ermittelt wurde. Es ist dann erkennbar, welche Interessenten über das zu errichtende Nahwärmenetz mit Wärme versorgt werden und welche Haushalte sich nicht wirtschaftlich anschließen lassen. Schließlich gibt der Kapitalwert an, um welchen Betrag die Umsetzung des geplanten Wärmeversorgungskonzeptes eine entsprechende Geldanlage zum Marktzins übersteigt.

3.9.3 Modellierung eines Nahwärmesystems auf lokaler Ebene

3.9.3.1 Beschreibung der Planungssituation in einem Beispieldorf

Eine Validierung des entwickelten Entscheidungsmodells erfolgt am Beispiel eines Dorfes, im Folgenden S-Dorf genannt, das auf dem Weg zu einem Bioenergiedorf ist. Diese ländlich geprägte Ortschaft hat ca. 600 Einwohner, davon sechs Vollerwerbslandwirte. Die Bebauung in S-Dorf besteht zum größten Teil aus freistehenden Einfamilienhäusern mit überwiegend älterer Bausubstanz. Nach dem Bau einer Biogasanlage südlich der Ortschaft entstand Interesse seitens der Anwohner und des Biogasanlagenbetreibers, die dort bei der Stromproduktion anfallende Wärme zur Beheizung der Wohngebäude zu nutzen. Für den Bau und Betrieb des Nahwärmenetzes wurde eine Genossenschaft gegründet. Das Netz ist zunächst nur für den südlichen Teil der Ortschaft (Unterdorf) vorgesehen. Es sollen aber auch Erweiterungsmöglichkeiten für den nördlichen Teil eingeplant werden. Zu Beginn der Validierung lag die Machbarkeitsstudie eines Ingenieurbüros mit einem Vorschlag zum späteren Netzverlauf vor. Eine besondere Herausforderung stellen die örtlichen Gegebenheiten dar: So kreuzt der geplante Streckenverlauf mehrmals fließende Gewässer und die Leitungen sollen stellenweise in einer das Dorf in Ost-West-Richtung durchquerenden Bundesstraße verlegt werden. Diese Besonderheiten führen einerseits zu einem finanziellen Mehraufwand in der Bauphase (Spülbohrungen, Entsorgung von teerhaltigem Straßenbelag etc.) und andererseits zu nur schwer abschätzbaren Risiken (Gewährleistungen im Bereich der Bundesstraße über einen langen Zeitraum).

Im Bereich des südlichen Ortsteils existieren 79 Wohngebäude; 37 Haushalte (ca. 47 Prozent) sind an einem Anschluss an das Nahwärmenetz interessiert. Der die Biogasanlage betreibende Landwirt beliefert die Betreibergesellschaft zu einem Festpreis mit Wärme. Dabei stellt er (gegebenenfalls durch Einsatz eines Heizölkessels) sicher, dass Wärmelieferungen auch in Phasen der Spitzenlast oder bei Anlagenstörungen erfolgen.

Abbildung 3-40 zeigt den zu beplanenden südlichen Ortsteil mit den einzelnen Hausobjekten, für die zum Teil Wärmeverträge abgeschlossen wurden; die Biogasanlage im Süden ist als Kreis gekennzeichnet. Der von dem Ingenieurbüro vorgeschlagene Netzverlauf umfasst eine Länge von ca. 1.500 Trassenmetern.

Die vorliegende Planungssituation wird zunächst als Graph abgebildet. Die Knotenpunkte stellen dabei die potenziellen Anschlussobjekte (grau)[26] sowie Kreuzungspunkte (weiß) dar, wobei die letztgenannten keine zusätzlichen Kosten verursachen, da sie, wie oben beschrieben, lediglich für die Modellierung benötigt werden. Die Kanten repräsentieren die möglichen Leitungsteilstücke des Nahwärmenetzes.



Abbildung 3-40: Südlicher Ortsteil von S-Dorf

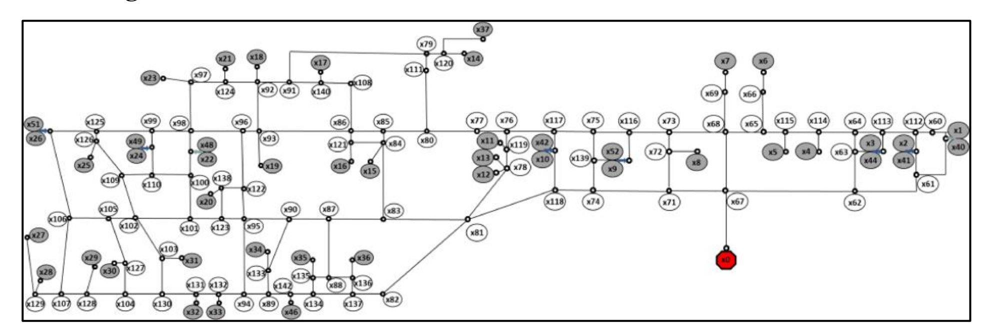


Abbildung 3-41: Graphische Veranschaulichung der Planungssituation (Unterdorf)

Die Abbildung 3-41 macht deutlich, dass eine Hauptaufgabe im Planungsprozess die Konzeptionierung des Netzes ist. Auf Grund zahlreicher unterschiedlicher Varianten für den Leitungsverlauf und der Vielzahl der Kreuzungspunkte ist dies deutlich komplexer, als das Ortsbild zunächst vermuten lässt (allein die Zahl der Knoten ist ungefähr dreimal so groß wie die Zahl der potenziellen Wärmekunden).

Die Wärmebedarfe wurden im Rahmen einer Befragung der anschlusswilligen Haushalte erhoben. Bei der Auswertung dieser Daten wurden deutliche Unterschiede im Bedarf festgestellt: Der geringste Bedarf liegt bei 9000 kWh/Jahr und der größte bei 80.000 kWh/Jahr. Die aus diesen spezifischen Wärmebedarfen entstehenden zukünftigen Umsätze gehen gemeinsam mit weiteren relevanten Einzah-

[26] Einzelnen Haushalten (z. B. Objekt 1) sind zwei Knoten zugeordnet (Knoten 1 und Knoten 40), da die Häuser von der Vorderseite oder von der Rückseite an das Leitungsnetz angeschlossen werden können.

lungen (z. B. staatliche Fördermittel) als positive Werte in die Berechnung des Kapitalwerts der einzelnen Anschlussobjekte ein. Als negative Werte werden Auszahlungen z. B. für den Hausanschluss, die Hausübergabestation oder für Betreuung und Wartung der Hausanschlüsse berücksichtigt. Die Wärmebedarfe und Kapitalwerte sind beispielhaft für zehn Anschlussobjekte in der nachfolgenden Tabelle 3-23 dargestellt. Bei der Berechnung wurde deutlich, dass der Wärmebedarf der ausschlaggebende Faktor für die Höhe der Kapitalwerte ist.

Tabelle 3-20: Kapitalwerte der Anschlussobjekte (Auszug)

Anschlussobjekt	1	2	3	4	5
Wärmebedarf (kWh/Jahr)	20.000	32.000	20.000	36.000	24.000
Kapitalwert (€)	22.440	33.206	22.440	36.795	26.029
Anschlussobjekt	6	7	8	9	10
Wärmebedarf (kWh/Jahr)	36.000	28.000	20.000	40.000	40.000
Kapitalwert (€)	36.795	29.618	22.440	40.384	40.384

Neben den Anschlussobjekten wurden auch die Kapitalwerte der Netzteilstücke bestimmt, die beispielhaft für zehn dieser Leitungsstücke in der nachstehenden Tabelle 3-24 aufgeführt sind. Ausschlaggebend sind hier insbesondere die Länge des Teilstücks und der bauliche Aufwand bei der Verlegung der Leitungen und der Wiederherstellung der ursprünglichen Oberfläche, der mit den oben bereits angesprochenen unterschiedlichen Kostensätzen für Garten-/Ackerfläche, Dorfstraße und Bundesstraße berücksichtigt wird.

Tabelle 3-21: Kapitalwerte der Netzteilstücke (Auszug)

Startknoten	0	1	2	3	4
Endknoten	67	61	61	63	114
Länge (m)	200	80	25	10	4,5
Art	Garten	Garten	Garten	Garten	Garten
Kapitalwert (€)	-44.877	-17.951	-5.610	-2.244	-1.535
Startknoten	5	6	7	8	9
Endknoten	115	66	69	72	116
Länge (m)	1,5	7	2	4	5
Art	Bundesstraße	Bundesstraße	Bundesstraße	Garten	Bundesstraße
Kapitalwert (€)	-512	-2.388	-682	-898	-1.706

Auf der Basis dieser ermittelten Grunddaten wird die Optimierungsrechnung durchgeführt.

3.9.3.2 Optimales Nahwärmenetz im Beispieldorf

Unter Anwendung der Optimierungssoftware Xpress IVE (Werners 2007) haben sich der in Abbildung 3-42 dargestellte optimale Verlauf des Nahwärmenetzes sowie die hieran anzuschließenden Hausobjekte ergeben.

Die (anzuschließenden) Hausobjekte sind weiterhin grau und die zu realisierenden Kreuzungspunkte weiß gekennzeichnet. Bei der wirtschaftlich optimalen Lösung werden einzelne Hausobjekte (Knoten 34 und 37, die in der Grafik nicht mehr aufgeführt sind) nicht angeschlossen, da die mit ihrer Einbeziehung verbundenen Auszahlungen die möglichen Einzahlungen aus dem Wärmeverkauf übersteigen. Der zugehörige Netzverlauf ist mit durchgezogenen Linien gekennzeichnet, zur besseren Übersichtlichkeit sind einzelne potenzielle, aber nicht zu realisierende Netzteilstücke gestrichelt dargestellt.

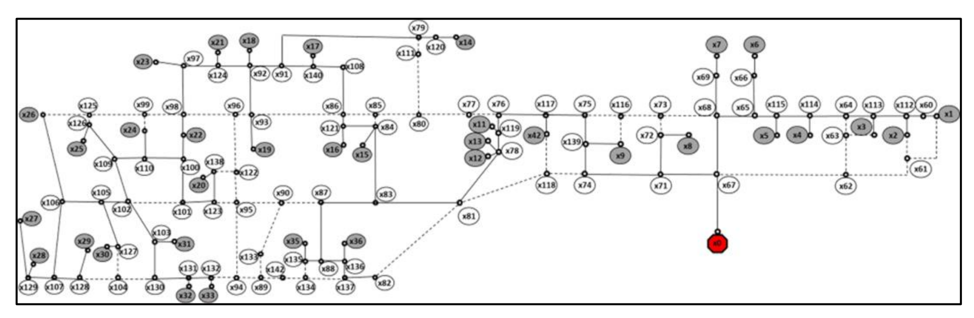


Abbildung 3-42: Optimales Nahwärmenetz für S-Dorf

Zur Ermittlung des Kapitalwerts des Projekts werden die einzelnen Kapitalwerte der angeschlossenen Hausobjekte und der realisierten Netzteilstücke addiert. Für die vorgeschlagene Lösung ergibt sich ein Wert von 433.716 €.

3.9.3.3 Analyse von Veränderungen der Planungssituation

Auf der Basis des Entscheidungsmodells und seiner Optimallösung lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand die Auswirkungen von Veränderungen in der Planungssituation analysieren. Dabei kann sich im Vergleich zur Optimallösung sowohl eine neue Auswahl der Anschlussobjekte als auch ein veränderter Netzverlauf mit entsprechenden wirtschaftlichen Konsequenzen ergeben, die sich in einer Abweichung zum bisherigen Kapitalwert ausdrücken. Darüber hinaus könnte man über die Berechnung von Schwellenwerten Aussagen dazu treffen, bei welchen Konstellationen (z. B. im Hinblick auf Wärmepreise, Kapitalmarktzinsen etc.) die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprojekts gefährdet wird.

Im Folgenden werden zwei Fälle beispielhaft vorgestellt. In der ersten Situation wird berücksichtigt, dass nicht alle der interessierten Haushalte tatsächlich einen Vorvertrag unterschrieben haben und sich dadurch die Anzahl der potenziellen Anschlussobjekte im Vergleich zum ersten Planungsergebnis reduziert hat. Im zweiten Fall sollen insbesondere die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit bei

einem Verzicht auf die Nutzung der Bundesstraße für das Leitungsnetz (mit Ausnahme von Querungen) untersucht werden.

Fall 1:

Im Vergleich zur Ausgangslage sind sieben Interessenten aus der weiteren Planung heraus zu nehmen, da sie sich vertraglich nicht binden wollten. Es ergibt sich dann ein neuer Vorschlag zum Netzverlauf (vgl. Abbildung 3-43).

Die Veränderungen im Nahwärmenetz betreffen die (neu hinzu gekommene) Teilstrecke zwischen Knoten 87 und 123 sowie die (nicht realisierte) Strecke zwischen den Knoten 92 und 97. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, auch Haushalt 34 wirtschaftlich anzuschließen. Durch den Wegfall der genannten Hausobjekte und den veränderten Netzverlauf verringert sich der Kapitalwert um 114.015 € (26%) auf 319.701 €. Diese erhebliche Reduzierung des Kapitalwerts legt Überlegungen nahe, ob man diesen finanziellen Spielraum nicht für günstigere Anschlusskonditionen o. Ä. nutzen sollte, um die ursprüngliche Anschlussquote wiederherzustellen. Eine solche Vergünstigung sollte allerdings (aus Gründen der Gleichbehandlung) allen beteiligten Haushalten gewährt werden.

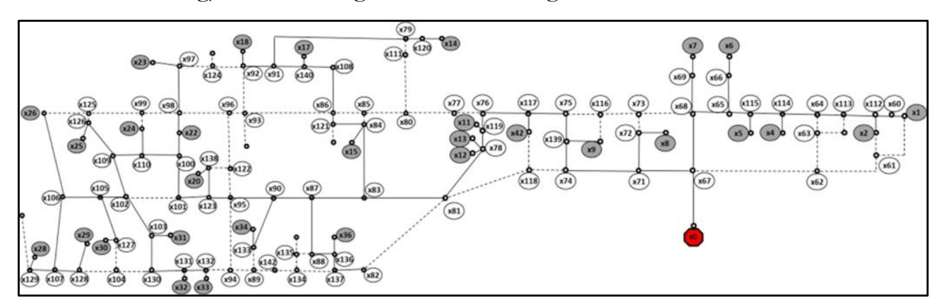


Abbildung 3-43: Verändertes optimales Nahwärmenetz für Fall 1

Fall 2:

Ausgehend von der in Fall 1 beschriebenen Planungssituation wird die Nutzung der Bundesstraße im Wesentlichen[27] ausgeschlossen. Der veränderte Netzverlauf ist in Abbildung 3-44 dargestellt.

Durch diese Vorgabe fallen nun auch die in der Optimallösung enthaltenen einzigen beiden Teilstücke auf der Bundesstraße (zwischen den Knoten 1 und 60 sowie den Knoten 65 und 68) weg. Dies führt einerseits zu einem Ausweichen auf die Strecke von Knoten 67 über 62 zu 64; andererseits lässt sich Haushalt 1 nicht mehr wirtschaftlich anschließen. Insgesamt verringert sich der Kapitalwert um weitere 11.632 € (4%) auf 308.069 €. Wenn man berücksichtigt, dass mit der Nut-

[27] Eine Querung der Bundesstraße oder die Nutzung des Bürgersteigbereichs ist dabei unkritisch; lediglich die Verlegung von Leitungen direkt auf der Bundesstraße wird auf Grund der damit verbundenen Gewährleistungsverpflichtungen ausgeschlossen. Zu den kritischen Strecken zählen die Verbindungsstrecken zwischen den Knoten 1 und 60, zwischen den Knoten 65 und 73 sowie die gesamte Strecke von Knoten 76 bis 26.

zung der Bundesstraße viele Störungen im Verkehrsablauf und Gewährleistungsrisiken verbunden sind, ist zu überlegen, ob man diesen vergleichsweise geringen wirtschaftlichen Nachteil von knapp 12.000 € nicht in Kauf nehmen sollte.

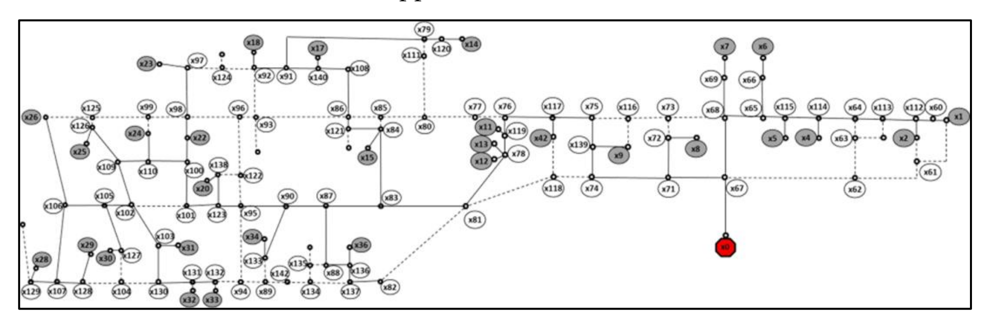


Abbildung 3-44: Verändertes optimales Nahwärmenetz für Fall 2

3.9.4 Modellierung eines Wärmeversorgungssystems auf regionaler Ebene

3.9.4.1 Ausgangslage

Aus einer überörtlichen Sicht stellt sich die Frage, wie für eine abgegrenzte Region ein geeignetes Wärmeversorgungskonzept auf der Basis nur beschränkt verfügbarer Biomasse[28] entwickelt werden kann. Dabei ist über folgende Aspekte zu entscheiden:

- Welche bereits bestehenden oder noch zu errichtenden Anlagen sollen als Wärmeerzeuger in das Konzept eingebunden werden?
- An welchen Standorten soll die Wärme erzeugt werden?
- Welche Wärmegroßabnehmer sollen von welchen Anlagenstandorten aus beliefert werden?

In Erweiterung der zuvor beschriebenen lokalen Planungssituation werden - ergänzend zum Unterdorf - als weitere Wärmegroßabnehmer in der näheren Umgebung das Oberdorf sowie ein Schulzentrum und ein Industriegebiet im Osten von S-Dorf einbezogen. Im Rahmen eines hierarchischen Ansatzes wird das Unterdorf als *ein* Wärmeabnehmer definiert, ohne dass die Details zu den einzelnen Wärmeabnahmemengen der Haushalte oder zum innerörtlichen Netzverlauf in Form einer Simultanplanung explizit berücksichtigt werden. Die entsprechenden Daten gehen vielmehr als aggregierte Größen (z. B. Gesamtwärmebedarf, Kapitalwert des lokalen Netzes) in das regionale Planungsmodell ein.

Zur Deckung des Wärmebedarfs dieser Großabnehmer stehen in der Beispielregion als potenzielle Produktionsanlagen zur Auswahl (siehe Abbildung 3-45):

[28] Zur Berechnung des Biomassepotenzials einer Region vgl. Kap. 3.4.

- die bereits vorhandene und von einem Landwirt betriebene Biogasanlage im Süden (B_1) sowie ggf. eine weitere im Norden (B_2),
- Holzhackschnitzelheizwerke (H_1, H_2, H_3) an den drei möglichen Produktionsstandorten sowie zusätzliche Leistungseinheiten für diese (Z_1, Z_2, Z_3) und
- Heizölkessel (O_1, O_2, O_3) an den drei Standorten.

Um zu gewährleisten, dass die Wärmeversorgung durch diese Anlagenkomponenten nicht nur im Jahresdurchschnitt, sondern auch in Zeiten des Spitzenbedarfs sichergestellt werden kann, wird die Wärmenachfrage der Bedarfsorte im Vergleich zum Lokalmodell differenzierter erfasst. Diese geht nicht als kumulierte Größe in die Berechnungen ein, sondern wird im Modell über eine (verallgemeinerte) Jahresdauerlinie abgebildet, auf deren Basis in Anpassung an den Bedarfsverlauf vier unterschiedlich lange Zeitbereiche mit den jeweiligen Bedarfsmengen (z. B. für das Schulzentrum W_{31}, W_{32}, W_{33}, W_{34}) definiert werden.

Mögliche Distributionswege zum Transport der Wärme sind als Pfeile in der Abbildung 3-45 zu erkennen.

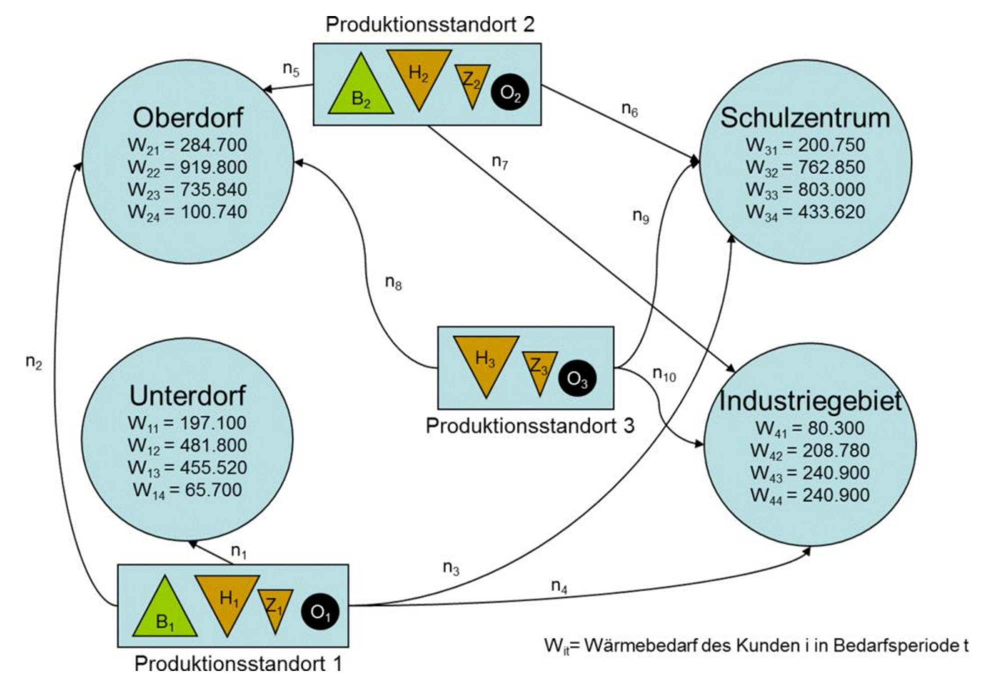


Abbildung 3-45: Ausgangslage im Regionalmodell

3.9.4.2 Modellierung der Planungssituation

Die oben beschriebene Planungssituation auf überörtlicher Ebene lässt sich – genau wie das innerörtliche Nahwärmenetz des Unterdorfs – in einem linearen Op-

timierungsmodell abbilden. Im Vergleich zum lokalen Modell stellt sich hier das Netz der Wärmeleitungen als deutlich übersichtlicher dar; die Zahl der realisierbaren Leitungsstücke von den drei möglichen Produktionsstandorten zu den vier Bedarfsorten beläuft sich auf 10. Die Zahl dieser Wärmeabnahmestellen ist auf Grund des Aggregationsniveaus so gering; denn hinter dem einzelnen Wärmekunden steht zwar wiederum ein eigenes zu optimierendes Nahwärmenetz (mit einer Vielzahl von Hausobjekten), dieses ist aber nicht Gegenstand der überörtlichen Planung (hierarchischer Ansatz).

Für die verschiedenen zur Auswahl gestellten Wärmeerzeuger (Biogasanlagen, Holzhackschnitzelheizwerke, zusätzliche Leistungseinheiten für diese sowie Heizölkessel) an den unterschiedlichen Standorten sind binäre *Variablen* zu definieren, die den Wert 1 oder 0 annehmen in Abhängigkeit davon, ob die entsprechende Anlage realisiert wird oder nicht. Die Gesamtzahl der Binärvariablen beträgt hier 25 und ist damit deutlich geringer als bei der lokalen Planung. Hinzu kommen allerdings noch kontinuierliche Variablen (mit beliebigen nicht-negativen Werten), die die Wärmemengen anzeigen, die in einem bestimmten Zeitbereich von einer konkreten Produktionsanlage zu einem Nachfrageort geliefert werden.

Umso umfangreicher ist das System der *Restriktionen*. Die diversen Bedingungen, die eingehalten werden müssen, um die reale Umsetzbarkeit der Modellergebnisse sicherzustellen, lassen sich folgendermaßen verbal beschreiben und sind in dem mathematischen Modell jeweils für alle Produktionskomponenten und Nachfragestandorte zu formulieren:

- Die Wärmebedarfe der einzelnen Nachfrageorte müssen für alle Zeitbereiche gedeckt werden, wenn der betreffende Ort Teil des Versorgungssystems wird. Das bedeutet, dass eine Kombination von Produktionskomponenten gewählt werden muss, die in der Summe eine ausreichende Wärmemenge zur Verfügung stellt, so dass die Versorgung der Bedarfsorte zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sowohl im regionalen Versorgungsnetz als auch im Nahwärmenetz innerhalb des Nachfrageorts zu Wärmeverlusten kommt, die bei der Festlegung der Kapazitäten über entsprechende Mengen an Zu- bzw. Abschlägen eingeplant werden.
- Es ist sicherzustellen, dass Wärmelieferungen aus einer Anlage nur erfolgen können, wenn diese Anlage auch gebaut wird (d. h. die zugehörige Variable den Wert 1 hat). Darüber hinaus können an einem Standort die Zusatzeinheiten für die Holzhackschnitzelheizwerke nur dann eingeplant werden, wenn dort bereits eine Hauptanlage für Holzhackschnitzel vorgesehen ist.
- Wärme kann nur dann an einen Bedarfsort geliefert werden, wenn ein entsprechendes Leitungsstück für den Wärmetransport existiert.
- Die einzelnen Anlagekomponenten müssen so ausgelegt sein, dass der für sie in der Summe erforderliche Bedarf an Energieträgern (Biomasse, Holzhackschnitzel, Heizöl) das verfügbare Angebot nicht übersteigt.

Die *Zielfunktion* schließlich greift wieder auf den Kapitalwert als Beurteilungskriterium zurück. Dabei fließen folgende Ein- und Auszahlungen für die einzelnen Modellkomponenten in seine Berechnung ein:

- *Kapitalwert eines Wärmegroßkunden*: Hier werden die Ergebnisse der lokalen Planung übernommen, die die innerörtlich anfallenden Ein- und Auszahlungen umfassen (Einzahlungen aus dem Wärmeverkauf, Auszahlungen für das Nahwärmenetz etc.). So lässt sich für das regional ausgerichtete Modell der Kapitalwert des einzelnen Bedarfsorts heranziehen.
- *Kapitalwert einer Anlagenkomponente*: In diesen Kapitalwert fließen Auszahlungen für die Errichtung[29] und den Betrieb der Anlage ein, wobei für den Betrieb die Zahlungen für die Energieträger nicht enthalten sind, da sie im Zusammenhang mit den Wärmelieferungen separat ausgewiesen werden.
- *Kapitalwert eines Netzteilstücks*: Vergleichbar zum lokalen Modell sind in Bezug auf die Netzteilstücke die Baukosten in die Berechnung einzubeziehen, die vorrangig von der Länge des einzelnen Teilstücks abhängen.
- *Kapitalwert der Energieträger*: Die Beschaffungskosten für die Energieträger, die für die einzelnen Wärmelieferungen benötigt werden, sind zu ermitteln und für den gesamten Planungszeitraum (ggf. unter Einbeziehung von Preissteigerungen) anzusetzen. Der Kapitalwert aus diesen Auszahlungen wird dann den entsprechenden Variablen, die die Wärmemengen repräsentieren, zugeordnet.

Aus der Summe der einzelnen Kapitalwerte ergibt sich schließlich der Gesamtkapitalwert des geplanten regionalen Versorgungssystems, dessen positiver Wert einen Hinweis auf die wirtschaftliche Realisierbarkeit der überörtlichen Wärmeversorgung liefert.

3.9.4.3 Ergebnisse des Regionalmodells

Verwendet man die oben beschriebenen Daten und pflegt sie in das Optimierungsmodell ein, so kann auch hier unter Einsatz der Software Xpress IVE die bestmögliche Konstellation für eine überörtliche Wärmeversorgung ermittelt werden. Aus den Lösungswerten der Modellvariablen lässt sich dann einerseits erkennen, welche Bedarfsorte mit Wärme aus dem Versorgungsnetz beliefert werden, an welchen Standorten Wärme produziert wird und welche Anlagen dafür installiert werden. Andererseits wird deutlich, welche Netzteilstücke gebaut werden und welche Wärmemengen auf den einzelnen Leitungsstrecken in den verschiedenen Zeitbereichen transportiert werden.

In der vorliegenden Planungssituation führte die Optimierungsrechnung zu dem in Abbildung 3-46 visualisierten Ergebnis.

[29] Da wie oben beschrieben die Biogasanlagen von Landwirten betrieben werden, werden für diese Anlagen weder Errichtungskosten noch Umsatzerlöse aus dem Stromverkauf berücksichtigt.

An das Fernwärmenetz werden sowohl das Ober- und das Unterdorf als auch das Schulzentrum angeschlossen. Um die Versorgung – auch zu Zeiten des Spitzenbedarfs – sicherzustellen, werden die Biogasanlagen an den Standorten 1 und 2 genutzt. Es wird ergänzend für die temporäre Spitzenlast ein Heizölkessel installiert, der lediglich zur Wärmeversorgung des Unterdorfs im Zeitbereich 1 eingesetzt werden muss. Das Oberdorf wird in erster Linie von Biogasanlage 1 beliefert, in geringem Ausmaß in den Zeitbereichen 1 und 2 auch von Anlage 2. Diese wird vorrangig zum Beheizen des Schulzentrums genutzt. Die konkreten gelieferten Wärmemengen sind für die einzelnen Zeitbereiche an den Netzverbindungen notiert.

Betrachtet man die Auswahl der Produktionsanlagen, so fällt auf, dass die Holzhackschnitzelheizwerke in der vorliegenden Situation keine attraktive Form der Wärmeproduktion sind. Unabhängig davon, ob diese Anlagen aus ökologischen Gesichtspunkten beispielsweise dem Heizölkessel vorzuziehen wären (s. Kap. 3.11), bewirken hier die ungefähr sechsmal so hohen Anfangsinvestitionen für ein Holzhackschnitzelheizwerk im Vergleich zum Ölkessel, dass auf den Einsatz von Holz zur Wärmeerzeugung aus Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten verzichtet wird. Der beschriebene Fixkostennachteil wird auch nicht durch die deutlich günstigeren Rohstoffpreise der Holzhackschnitzel im Vergleich zum Heizöl kompensiert, zumal der Hauptanteil der Wärmeerzeugung durch die Biogasanlagen geleistet wird und die zusätzliche Wärmequelle nur in einem relativ kurzen Zeitraum von zwei Wochen zum Einsatz kommt.

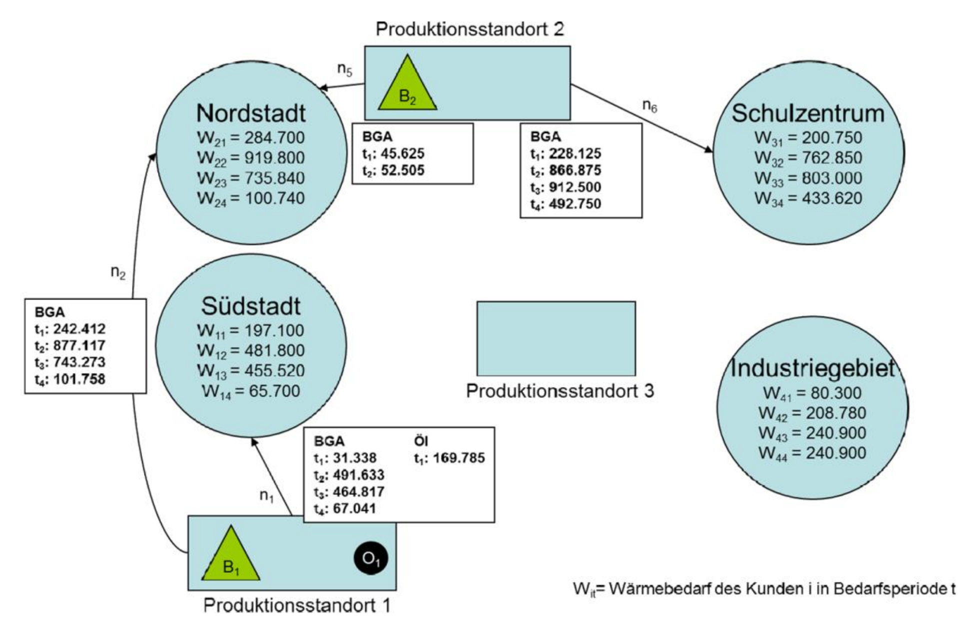


Abbildung 3-46: Ergebnis der regionalen Optimierung

Die gegenüber den gesamten Auszahlungen in der Summe deutlich höheren Einzahlungen aus dem Wärmeverkauf führen dazu, dass das Projekt mit einem Kapitalwert von knapp 1.066.000 € als wirtschaftlich vorteilhaft einzustufen ist.

3.9.5 Diskussion

Das entwickelte lokale Modell wurde am Beispiel von S-Dorf validiert. Bei der Abbildung der realen Planungsdaten im Modell zeigten sich kleinere Unstimmigkeiten, die durch eine entsprechende Modellanpassung und -weiterentwicklung ausgeräumt wurden. Darüber hinaus wurden auf der Basis des optimierten Nahwärmenetzes für die Ortschaft relevante Alternativberechnungen durchgeführt, die durch Änderungen in der Datengrundlage oder Vorgaben durch die Betreibergesellschaft ausgelöst werden können und jeweils zu veränderten Netzverläufen und auch Kapitalwerten führten. Welche dieser für die jeweilige Situation optimalen Lösungsvorschläge realisiert wird, liegt in der Entscheidung der Beteiligten.

In der Planungsphase notwendig ist eine gute Abstimmung zwischen den „Modellierern" und dem planenden Ingenieurbüro. Die Zusammenarbeit kann im Hinblick auf die Verantwortlichkeiten organisatorisch unterschiedlich gestaltet werden. Es ist dabei vor allem sicher zu stellen, dass der Informationsaustausch zwischen den unterschiedlichen an der Planung beteiligten Gruppen (insbesondere Ingenieur und „Modellierer") gewährleistet ist.

Zur Planung eines überörtlichen Wärmeversorgungskonzepts wurde ein Regionalmodell entwickelt und damit die Entscheidungssituation für eine ausgewählte Beispielregion abgebildet. Die Optimierungsrechnungen liefern Vorschläge zu der Auswahl der Wärmeerzeugungsanlagen, deren Kapazitäten und Standorten sowie zur Zuordnung der Wärmeabnehmer. Auch hier lassen sich die wirtschaftlichen Auswirkungen unterschiedlicher Rahmenbedingungen analysieren.

Die Ergebnisse der entwickelten Modelle zur Planung von Wärmeversorgungssystemen bieten eine gute Entscheidungsgrundlage für die beteiligten Akteure auf lokaler oder regionaler Ebene. Auch hier hängt es von den Zielen und Prioritäten der Entscheidungsträger ab, welcher der verschiedenen Vorschläge letztendlich zur Umsetzung kommt. In jedem Fall wird ihnen aufgezeigt, welche wirtschaftlichen Konsequenzen mit ihrer Auswahl verbunden sind.

Literatur

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. Stand Febr. 2017. 45 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=12

Daub, A., Uhlemair, H., Ruwisch, V. & Geldermann, J. (2013). Optimising Bioenergy Villages‘ Local Heat Supply Networks. In: Ruppert, H., Kappas, M. & Ibendorf, J. (Hrsg.): *Sustainable Bioenergy Production – An Integrated Approach*. S. 219-238. Dordrecht: Springer

EEG (2012). Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromeinspeisung aus Erneuerbaren Energien vom 28. Juli 2011. *Bundesgesetzblatt* Jahrgang 2011 Teil I Nr. 42, Berlin

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016). *Basisdaten Bioenergie Deutschland* 2016. 52 S. Gesichtet am 31.11.2016: http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_20162.pdf

Götze, U. (2014). *Investitionsrechnung*. 7. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer

Sohmen, E. (1976). *Allokationstheorie und Wirtschaftspolitik*. Tübingen: Mohr

Uhlemair, H. (2012). *Optimierung des Produktions- und Distributionssystems von Bioenergiedörfern*. 174 S. Göttingen: Cuvellier

Werners, B. (2007). *Kurzeinführung in XPress-IVE – Standardsoftware zur Lösung linearer, kontinuierlicher und (gemischt-)ganzzahliger Programmierungsmodelle*. Bochum

3.10 Bioenergetische Nutzungskonzepte für kontaminierte Standorte

Benedikt Sauer, Wiebke Fahlbusch, Hans Ruppert

3.10.1 Einleitung

Am Ende des Jahres 2015 existieren in Deutschland gut 8000 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von insgesamt 3500 MW. Auf rund 2,2 Mio. ha. werden Energiepflanzen angebaut (FNR 2016). Dies entspricht etwa 12 % der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland. Diese Zahlen zeigen deutlich den besonderen Stellenwert der Bioenergie bei der Erzeugung von Strom und Wärme im Bereich der Erneuerbaren Energien in der Bundesrepublik. Die Biogasanlagen werden mit verschiedenen Inputsubstraten betrieben, meistens mit Energiepflanzen und mit tierischen Exkrementen (Gülle, Festmist). Da die Ansprüche an die ackerbauliche Fläche vielfältig sind (Produktion von Nahrungsmitteln, Futtermitteln, Energiepflanzen, Saatgut, Werk- und Baustoffen, Umwelt- und Naturschutzflächen, sowie Siedlungsfläche) und die Fläche limitiert ist, wird es zunehmend schwierig, Areale für den Energiepflanzenanbau zu nutzen.

Andererseits gibt es in Deutschland landwirtschaftliche Flächen, die mit Schwermetallen und anderen Schadstoffen belastet sind. Belastete Areale finden sich zum Beispiel in den Überschwemmungsgebieten entlang großer Flüsse, in Industriegebieten und in Arealen mit Abwasserverrieselung. Zusätzlich sind häufig Flächen in der Nähe ehemaliger Lagerstätten sowie Areale mit Erz- und Metallverarbeitung belastet. Schätzungen gehen davon aus, dass potenziell bis zu 10,4 % der landwirtschaftlichen Fläche Deutschlands mit Schadelementen belastet sein kann (abgeschätzt nach Flächenangaben von Knappe et al. 2008). An Stelle von Nahrungs- oder Futtermitteln, die in der Regel auf kontaminierten Flächen vermehrt Schadstoffe aufnehmen, sollten in diesen Arealen bevorzugt Energiepflanzen angebaut werden. Die Flächen sind häufig nicht nur mit einem sondern mit mehreren Schadelementen wie z.B. Chrom, Kupfer, Eisen, Zink, Molybdän, Cadmium, Blei, Arsen, Antimon, Wismut, Thallium, Uran und oft zusätzlich mit organischen Schadstoffen belastet. Konventionelle Bodenreinigungsmethoden wie Bodenaushub verbunden mit einer chemischen oder mechanischen Reinigung oder biologische Methoden (Phytoremediation) sind entweder für diese ausgedehnten Flächen zu kostspielig, oder sie sind in der Regel nicht effektiv, alle relevanten Schadelemente aus dem Boden zu extrahieren (s. Kap. 3.10.3.7). Auch wenn bei der Phytoremediation, dem Entzug von Schadstoffen durch Pflanzen, solche auswählt würden, die möglichst viel Schadelementmenge aufnehmen, so könnte zwar Bioenergie erzeugt werden. Aber nach geltendem Recht (Düngemittelverordnung 2012) dürften die Gärreste aus der Biogaserzeugung nicht mehr als wertvoller Wirtschafts-

dünger eingesetzt und auf die Felder zurückgebracht werden, sondern müssten als Sondermüll entsorgt werden. Zudem würde diese Remediation bei stark belasteten Standorten viele Jahrhunderte bis Jahrtausende andauern und nur für wenige Elemente funktionieren (Sauer & Ruppert 2013). Das hier favorisierte Konzept geht umgekehrt vor: Auf den belasteten Standorten werden ertragreiche Pflanzen mit geringer Schadelementaufnahme angepflanzt, mit denen Bioenergie erzeugt wird. Die geringen Anteile an kritischen Elementen, die dennoch von den Pflanzen aufgenommen werden, können über den Gärrest als Wirtschaftsdünger wieder auf den belasteten Boden zurückgeführt werden. Insgesamt werden mit diesem Nutzungskonzept die Flächen sinnvoll genutzt und die Gefahr einer Schadelementbelastung von Nahrungs- und Futtermitteln vermieden. Die entzogenen Nährelemente gelangen auf diese Weise wieder in die Böden.

Neben Pflanzen für die Biogaserzeugung sind Kurzumtriebsplantagen mit schnellwachsenden Baumarten eine weitere energetische Nutzungsoption für belastete Flächen (siehe Kap. 3.10.3.5). Auch hier sollten die Baumarten ausgewählt werden, die möglichst wenig Schadelemente aufnehmen, da diese bei der Verbrennung wieder freigesetzt werden können (Kap. 3.11). Hierzu wurden systematisch Anbauversuche mit unterschiedlichen Pflanzen mit unterschiedlich belasteten Böden in Töpfen sowie auf Böden einiger kontaminierter Areale durchgeführt.

3.10.2 Methoden

3.10.2.1 Versuchsaufbau im Topfversuch

Verschiedene Energiepflanzen wurden in 130 Töpfen im Freiland angebaut. Die Töpfe enthielten Bodenmaterial von zehn verschieden belasteten Standorten in Niedersachsen. Jeweils die Oberböden (Ackerkrume) wurden beprobt. Ein nahezu unbelasteter Standort (Trögen) diente als Referenzstandort. Die Standorte sind in Tabelle 3-25 ausführlich hinsichtlich der Elementgehalte, Bodenkorngrößen und pH-Werte charakterisiert. Der Anbau der Pflanzen erfolgte in einem Zweikulturnutzungssystem, d. h. es konnten durch Aussaat einer Winterungs- und einer Sommerungskultur pro Jahr zwei Kulturen geerntet werden. Es wurde jeweils die gesamte oberirdische Pflanze geerntet – analog der Pflanzenernte für Biogasanlagen. Gleichzeitig wurden die Kulturen auf einem Freilandversuchsfeld angebaut. Bei früheren Arbeiten zum Elementtransfer in Pflanzen (z. B. in den 1970er-Jahren) wurden üblicherweise Gefäßversuche angelegt, bei denen Schadelemente zu Versuchsbeginn z. B. als aufgelöstes Salz oder Pulver in den Boden eingemischt wurden. In diesen Experimenten nehmen die Pflanzen meist systematisch wesentlich mehr Schadelemente als bei gleicher Belastung im Freiland auf. In dem hier beschriebenen Experiment wurden dagegen Böden direkt von belasteten Standorten in die Töpfe gefüllt, damit eine gute Übertragbarkeit auf Praxisflächen gegeben ist.

Im Topfversuch kann bei großen Pflanzen (z. B. Mais und Sonnenblume) jeweils nur eine einzige Pflanze geerntet werden. Wir konnten nachweisen, dass sich Elementgehalte in verschiedenen Individuen der gleichen Sorte ebenfalls um bis zu 50 % unterscheiden können. Daher sollten möglichst für eine Probe immer mehrere Individuen vereint werden. Im Topfversuch war dies allerdings nicht realisierbar. Der Trend über die zehn Standorte und über die fünf Anbaujahre ist aber dennoch eindeutig und wird auf den folgenden Seiten dargestellt.

3.10.2.2 Boden- und Pflanzenanalysen

Der pH-Wert der Böden wurde nach der DIN ISO 10390, Teil 1 (10 g Boden in 25 ml 0,01 mol/l $CaCl_2$-Lösung) bestimmt. Die Korngrößenverteilung der Böden wurde mittels Laserdiffraktion (Beckman Coulter LS 13320) gemessen. Die Pflanzen wurden im Stadium des maximalen Biomasseertrages (Stadium der Milchreife bei etwa 30 % Trockensubstanz) geerntet.

Die getrockneten Pflanzen- und Bodenproben wurden mit einer Achatkugelmühle feingemahlen und mit einem Säuretotaldruckaufschluss mit Salpetersäure, Fluss- und Perchlorsäure (bei Böden zusätzlich mit Salzsäure) komplett in Lösung gebracht. Die Gehalte von etwa 50 untersuchten Haupt- und Spurenelementen in den Probenlösungen wurden mittels Massenspektrometer und optischem Spektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma als Anregungsquelle (ICP-MS, ICP-OES) bestimmt. Es wurden Blindproben während dieser Prozedur mitgeführt, um mögliche Kontaminationen während der Aufbereitung und Analyse entdecken zu können. Die Richtigkeit der Elementgehalte wurde durch den Vergleich von mitgeführten international zertifizierten Referenzproben gewährleistet. Im Folgenden werden nur die relevantesten Elemente dargestellt.

3.10.2.3 Rechtsverordnungen und Grenzwerte

Bei der hier vorgestellten Thematik sind folgende Rechtsverordnungen zu beachten.

Grenzwerte für Böden nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)

Mit Hilfe von Vorsorge- und Prüfwerten für Böden nach der BBodSchV kann für einige Elemente beurteilt werden, ob ein Boden bereits als belastet gilt oder nicht. Die Werte sind in der Tabelle 3-22 zusammengestellt.

In der BBodSchV sind zusätzlich Prüf- und Maßnahmewerte angegeben (Tabelle 3-23), ab derer eine ackerbauliche Nutzung wahrscheinlich problematisch wird. Es kommen zwei Extraktionsverfahren zur Anwendung: Königswasserextrakt (KW) und Ammoniumnitratextrakt (AN). Hierbei handelt es sich um extrahierbare Gehalte und nicht um Gesamtkonzentrationen, wie meist angegeben.

Tabelle 3-22: Vorsorge- bzw. Prüfwerte in mg/kg Boden, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine Prüfung durchzuführen ist (Königswasserverfahren; nach der Bundesbodenschutzverordnung 1999)

Bodenart	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
Ton	100	1,5	100	60	70	1	200
Lehm/Schluff	70	1	60	40	50	0,5	150
Sand	40	0,4	30	20	15	0,1	60

Stark schluffige Sande sind entsprechend der Bodenart Lehm/Schluff zu bewerten. Bei Böden der Bodenart Ton mit einem pH-Wert von kleiner als 6,0 gelten für Cadmium, Nickel und Zink die Vorsorgewerte der Bodenart Lehm/Schluff, bei Böden der Bodenart Lehm/Schluff entsprechend die Vorsorgewerte der Bodenart Sand. Bei Böden mit einem pH-Wert von kleiner als 5,0 sind die Vorsorgewerte für Blei entsprechend der ersten beiden Anstriche herabzusetzen.

Tabelle 3-23: Grenzwerte für ackerbaulich genutzte Böden nach der Bodenschutzverordnung im Hinblick auf die Pflanzenqualität (BBodSchV).

BBodSchV	Methode*	Prüfwerte	Maßnahmenwerte
		mg/kg	mg/kg
Arsen	KW	200	-
Cadmium	AN	-	0,04[x]/ 0,1
Blei	AN	0,1	-
Quecksilber	KW	5	-
Thallium	AN	0,1	-

* KW = Königswasserextrakt, AN = Ammoniumnitratextrakt

[x] Für Brotweizenanbau oder Cd-anreichernde Gemüsearten

Grenzwerte in Lebens- und Futtermitteln

Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2006) hat in der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln festgelegt. Neben Nitrat, Mykotoxinen u.a. sind auch Cadmium und Blei aufgeführt. Tabelle 3-24 zeigt exemplarisch Grenzwerte für Getreideerzeugnisse.

Tabelle 3-24: Grenzwerte für Metalle bei einigen Nutzpflanzen nach der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006.

Metalle	mg/kg (Frischgewicht)	
Blei	0,2	Getreide, Hülsengemüse, Hülsenfrüchte
Cadmium	0,1	Getreide (außer Weizen, Reis)
	0,2	Kleie, Weizengetreide, Keime, Reis

Werden auf kontaminierten, ackerbaulichen Flächen Futtermittel erzeugt, ist neben der Gefährdung der Tiergesundheit auch der Eintritt der Schadelemente in den Lebensmittelkreislauf zu befürchten. Daher enthält die Futtermittelverordnung (FuttMV 1982 bzw. 2013), bzw. die Richtlinie der EU (2002/32/EG) über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung (Europäisches Parlament und Rat der Euro-

päischen Union, 2002) ebenfalls Höchstgehalte für Pflanzen. Die Richtlinie sagt aus, dass in Futtermittelausgangserzeugnissen (ohne Grünfutter) weniger als 10 mg/kg Blei bzw. 1 mg/kg Cadmium enthalten sein dürfen.

3.10.2.4 *Mobilität der Schwermetalle*

Die Verfügbarkeit der Schwermetalle für Pflanzen hängt von vielen Parametern ab. Unter anderem sind die Bodenart, der pH-Wert und die Gesamtgehalte der Elemente im Boden ausschlaggebend. Allerdings ist die Verfügbarkeit bei verschiedenen Elementen unterschiedlich. Die wichtigsten potenziell toxischen Elemente können grob in drei Kategorien eingeteilt werden (Kabata-Pendias 2011; Sauer & Ruppert 2013):

- *Stark mobil* und leicht pflanzenverfügbar:
  Cadmium, Thallium, Zink
- *Mobil* und gut pflanzenverfügbar:
  Kupfer, Molybdän, Nickel
- *Eher immobil* und stark im Boden gebunden, Verunreinigung des Erntegutes hauptsächlich durch anhaftendes Bodenmaterial möglich:
  Blei, Chrom(III), Titan.

Ahnlich ist die relative Löslichkeit der Elemente ins Wasser einzustufen und damit auch ihr Transfer in die Oberflächengewässer und das Grundwasser.

3.10.3 Ergebnisse und Diskussion

3.10.3.1 Charakterisierung der Bodenbelastung der untersuchten Standorte

Die beobachteten Böden sind mit diversen Schadelementen belastet (Tabelle 3-25), die in vielen Fällen über den Grenzwerten der Klärschlammverordnung liegen. Klärschlamm darf als Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen nur dann ausgebracht werden, wenn die Böden diese Grenzen unterschreiten. Überschreitungen der Grenzwerte in Tabelle 3-28 sind fett markiert. Der Standort in Trögen dient als Referenz für unbelastete Böden. Entsprechend sollten die Pflanzen vom Standort Trögen typische Hintergrundwerte aufweisen.

Die kontaminierten Böden können verschiedenen Belastungshistorien zugeordnet werden:

1. *Abwasserverrieselungsflächen:* Der mit „Braunschweig“ bezeichnete Boden stellt eine Abwasserverrieselungsfläche dar. Laut Klärschlammverordnung ist dieser Standort noch unbelastet, allerdings sind die Cadmiumgehalte bereits um den Faktor 2 gegenüber dem natürlichen Hintergrundwert erhöht. Schwülper ist ein besonderer Standort, er wurde lange Zeit als Auffangbecken für große Mengen Abwasser genutzt und stellt somit einen Standort dar, der extrem Klärschlamm-betont ist. Beide Böden zeichnen sich durch sandige Korngrößen aus. Der

Standort Schwülper weist zudem einen geringen pH-Wert von 4,4 auf, was die Mobilität der Schwermetalle erhöht.

2. *Überschwemmungsgebiete von Flüssen:* Heere, Dorste, Ohrum und Schladen sind Flächen in Überschwemmungsgebieten der Flüsse Innerste, Oder bzw. Oker. Dort treten besonders Belastungen mit Cadmium, Kupfer, Blei und Zink auf. Auch heute noch werden bei Überschwemmungen durch Schmelzwasser- und Starkregenereignisse im Harz immer noch schwermetallbelastete Schwebfrachten der Flüsse in den überfluteten Auen im Vorland abgelagert (Deicke & Ruppert 2013).
3. *Ehemalige Bergbau/Verhüttungsaktivitäten:* Die Standorte bezeichnet mit Harlingerode 1-3 befinden sich in der Nähe einer ehemaligen Zink-Bleihütte in Harlingerode zwischen Goslar und Bad Harzburg, in der die Erze aus dem Goslarer Rammelsberg verhüttet wurden. Über den Schornstein wurde das umliegende Gebiet oberflächig kilometerweit äußerst stark belastet, insbesondere mit Cadmium, Blei und Zink.

Tabelle 3-25: pH-Werte und ausgewählte Elementgehalte in mg/kg in der Trockensubstanz der untersuchten Böden.

Standort	pH	Bodenart*	Cd	Cu	Mo	Ni	Pb	Tl	Zn
Trögen	**5,1**	Us	0,3	11	0,5	16	29	0,46	52
Braunschweig (BS)	**6,9**	Ss	0,7	15	0,2	5	15	0,18	44
Dorste	**6,0**	Us	0,8	**77**	0,8	28	**397**	0,49	**416**
Schwülper	**4,4**	Su2	**3,6**	**62**	1,4	13	88	0,31	121
Heere	**7,0**	Us	**3,9**	54	0,5	36	**1716**	0,64	**718**
Schladen	**7,0**	Us	**6,6**	**260**	0,9	40	**2427**	2,37	**1773**
Ohrum	**6,8**	Us	**12,8**	**350**	1,5	**54**	**2232**	2,08	**2760**
Harlingerode 3	**5,8**	Ut2	**13,3**	50	1,8	20	**303**	1,40	**684**
Harlingerode 2	**7,0**	Us	**14,5**	42	1,6	20	**236**	1,14	**699**
Harlingerode 1	**6,9**	Us	**20,1**	**102**	3	23	**815**	2,19	**820**
AbfKlärV-Grenzwerte#			***1,5***	***60***		***50***	***100***		***200***

* Bodenartbestimmung nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung, Ad-Hoc-AG Boden (2005).

\# Bei Böden mit Tongehalten unter 5 % oder pH-Wert zwischen 5 und 6 ist eine Aufbringung von Klärschlamm auch dann verboten, wenn Cadmium bereits 1 mg/kg oder Zink 150 mg/kg überschreitet. Bei pH-Werten unter 5 darf kein Klärschlamm aufgebracht werden.

3.10.3.2 Elementgehalte der Pflanzenproben auf den unterschiedlich belasteten Böden

Die Ergebnisse aus dem Freiland-Topfversuch wurden mit drei Freilandversuchsfeldern verglichen. Dieser Vergleich zeigte Abweichungen vom Topf- zum Freilandversuch von bis zu 50 %, jedoch ist kein genereller Trend zu verzeichnen. Die beobachteten Abweichungen können durch folgende Einflussfaktoren verursacht sein:

1. Meteorologie: unterschiedliches Wetter beim Freilandtopfversuch in Göttingen und den Freilandversuchsfeldern im nördlichen Harzvorland
2. Fruchtfolge: differierende Vorfrüchte
3. Nährstoffversorgung: unterschiedliche Düngung
4. Wasserversorgung: schlechtere Wasserversorgung im begrenzten Topf
5. Wurzelraum: Pflanzen im Freiland können in tiefere Bodenschichten vordringen, in denen eine geringere oder keine Belastung vorliegt.
6. Lufteintrag: Unterschiede beim atmosphärischen Eintrag im Testfeld in der Universität Göttingen und in den belasteten Arealen (wie z.B. am Standort Harlingerode).

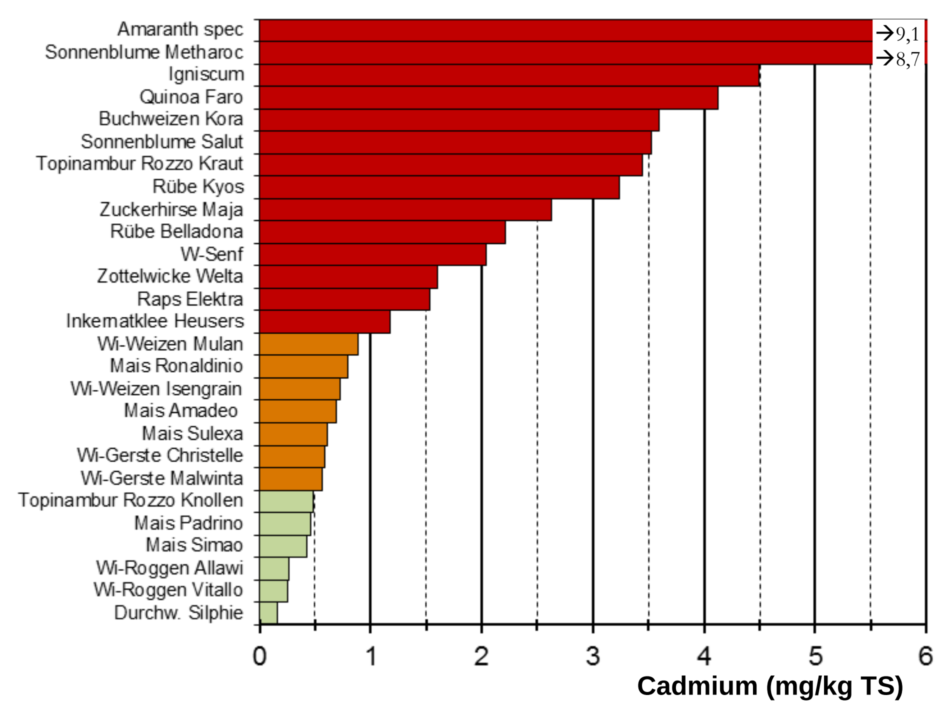


Abbildung 3-47: Cadmiumgehalte in mg/kg in der Trockensubstanz (TS) in ausgewählten Pflanzen des Standortes Ohrum. Boden: 13 mg/kg Cadmium, pH-Wert 6,8.

Cadmium ist ein sehr mobiles und toxisch wirkendes Schwermetall und wird besonders stark in die Pflanzen verlagert. Daher steht es im Zentrum unserer Darstellungen. In Abbildung 3-47 sind Cadmiumgehalte von ausgewählten getesteten Pflanzen (gesamte oberirdische Pflanze) auf dem Boden Ohrum dargestellt. Es wird deutlich, dass auf gleichem Boden verschiedene Pflanzen in ihrem Cadmiumgehalt extrem stark variieren: Die Cadmiumgehalte der Durchwachsenen Silphie und von Amarant liegen um Faktor 65 auseinander. Amarant, Riesenknöterich, Miscanthus, Sonnenblumen und Topinambur nehmen sehr viel Cadmium auf. Diese Kulturen sollten demnach auf Cadmium-belasteten Standorten vermieden werden. Sehr wenig Cadmium nehmen hingegen die Durchwachsene Silphie, Winter-Roggen Vitallo, und Mais Padrino auf. Bis zu einem Gehalt von 1 mg/kg dürften die Pflanzen noch verfüttert werden.

Wie verhalten sich die Elemente bei der Biogasbildung im Fermenter? Während der Gasbildung gehen verschiedene Elemente (Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff) in das Biogas über und werden als Energieträger abgeführt, so dass sich die Konzentrationen der im Gärrest verbleibenden Elemente etwa um den Faktor 3 erhöhen (Sauer 2010). Bei einer Biogasnutzung sollten daher hauptsächlich Pflanzen als Substrat verwendet werden, die einen Gehalt von unterhalb 0,5 mg/kg TS Cadmium aufweisen. Ansonsten ist eine Überschreitung des Grenzwertes der Düngemittelverordnung von 1,5 mg/kg Cadmium im Gärrest zu befürchten. Ein zusätzlicher Input von Gülle würde im Normalfall den Cadmiumwert etwas verdünnen, allerdings können auch in Gülle Cadmiumgehalte von 0,7 mg/kg TS erreicht werden (Göhler & Emmerling 2007).

Es kann also der Fall eintreten, dass der Gärrest bei einem Input von Gülle und stark akkumulierenden Pflanzen wie z. B. Sonnenblume, Topinambur oder Amarant auch bei unbelasteten Standorten einen höheren Cadmiumgehalt aufweist als der Gärrest einer Biogasanlage, die mit wenig akkumulierenden Pflanzen (wie Silphie, Roggen, Mais) von belasteten Flächen gespeist wird. Dies setzt allerdings das Wissen voraus, welche Pflanzen Schadelemente akkumulieren und welche nicht. Dieses Wissen wurde hier erarbeitet.

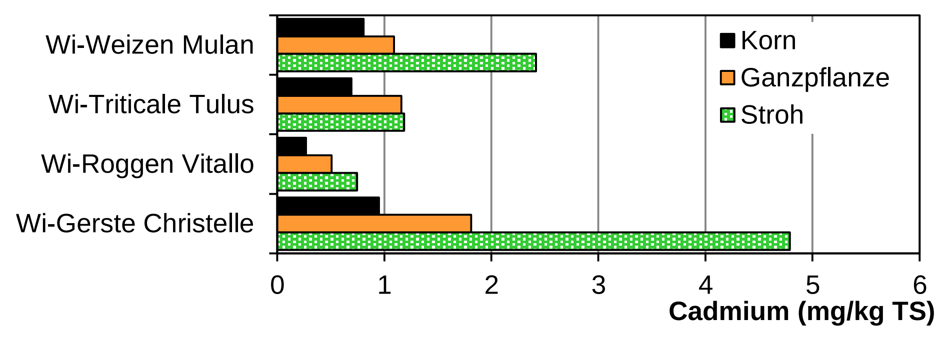


Abbildung 3-48: Cadmiumgehalte in mg/kg Trockensubstanz (TS) in Korn, Stroh und Ganzpflanze auf dem Freilandversuchsfeld Harlingerode 2; Cd im Boden = 15 mg/kg; pH 7,0.

Für die Futter- und Nahrungsmittelproduktion ist es wichtig zu wissen, in welchen Pflanzenteilen die Schwermetalle besonders stark akkumulieren. Exemplarisch wurde dies im Freiland am Standort Harlingerode 2 untersucht. Im Korn der Wintergetreidesorten ist gegenüber den Gesamtpflanzen (ohne Wurzel) weniger als 80% des Cadmiumgehaltes enthalten (Abbildung 3-48). Im Stroh reichert sich Cadmium am stärksten an. Es ist zu beachten, dass die Ganzpflanze während der Milchreife, Korn und Stroh in der Vollreife geerntet wurden.

Für Topinambur wurde ebenfalls festgestellt, dass in der Knolle gegenüber dem Kraut nur ein geringer Anteil an Schadelementen vorhanden ist.

3.10.3.3 Effekte des Arten- und Sortenunterschiedes auf die Anreicherung von Schwermetallen in verschiedenen Pflanzen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Cadmiumkonzentration in den Hauptgetreidearten in der Reihenfolge Roggen < Gerste < Weizen ansteigen (Werte für Sorten gemittelt). Abbildung 3-49 zeigt diesen deutlichen Trend bei fast allen Standorten.

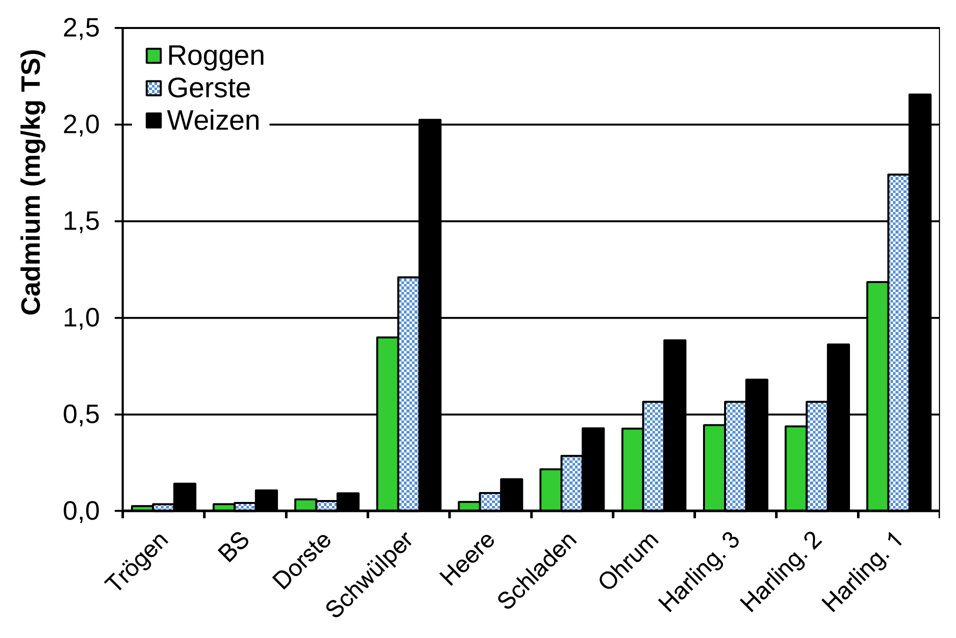


Abbildung 3-49: Cadmiumgehalte (in mg/kg TS) in der Ganzpflanze (ohne Wurzeln) auf verschiedenen Standorten im Topfversuch; Medianwerte verschiedener Sorten von Roggen, Gerste und Weizen.

Bemerkenswert ist außerdem, welche hohen Cadmiumgehalte in den drei Arten auf dem Standort Schwülper erreicht werden. Obwohl die Standorte Schwülper mit 3,6 mg/kg und Heere mit 3,9 mg/kg vergleichbare Cadmiumgehalte im Boden aufweisen, enthalten die Pflanzen aus Schwülper sehr hohe Cadmiumwerte. Dies hängt

mit dem geringen pH-Wert von nur 4,4 im sandigen Ackerboden von Schwülper zusammen, was zu einer stark erhöhten Mobilisierung des Elementes Cadmium sowie einiger anderer potenziell schädlich wirkender Elemente wie z.B. Zink und Kupfer führt.

Innerhalb des Projektes konnten neben unterschiedlichen Pflanzenarten auch einige ausgewählte Sorten im Topfversuch getestet werden. Trotz der geringen Anzahl an untersuchten Sorten je Art (ca. 3-7 Sortenvarianten je Art) sind deutliche Unterschiede im Cadmiumgehalt der einzelnen Sorten feststellbar. Diese Untersuchungen müssten bezüglich ihrer Relevanz für die Nutzung als Energie-, bzw. Nahrungs- und Futtermittelpflanzen weiter vertieft werden. Im Folgenden werden Sortenunterschiede einiger Arten aufgeführt.

Sortenunterschiede im Weizen

Es wurden die Winterweizensorten Isengrain und Mulan sowie der Sommerhartweizen Duramar untersucht. Der Trend der Cadmiumgehalte in den verschiedenen Weizensorten über alle Standorte hinweg ist: Isengrain < Mulan < Duramar (Abbildung 3-50). Der Winterweizen Mulan war in den Töpfen Trögen, Schwülper und Schladen ausgewintert und konnte nicht beprobt werden. Die entsprechenden Daten fehlen demnach in der Abbildung.

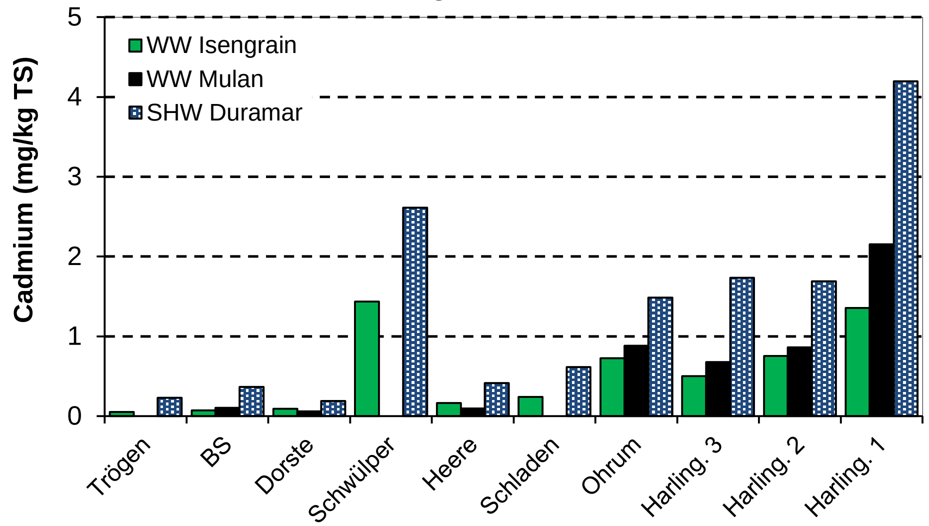


Abbildung 3-50: Cadmiumgehalte (in mg/kg TS) in drei getesteten Winterweizensorten auf den 10 Standorten; WW = Winterweizen, SHW = Sommerhartweizen.

Bleigehalte im Weizen

Blei ist erst bei sehr niedrigen pH-Werten mobil und spielt daher im Ackerbau als Schadelement gegenüber Cadmium eine untergeordnete Rolle. Bei Verunreinigung des Erntegutes durch kontaminierten Boden könnten allerdings erhöhte Gehalte auftreten. In Tabelle 3-26: Bleigehalte der Weizensorten im Topfversuch. sind

Bleigehalte der Weizensorten aus dem Topfversuch aufgelistet. Selbst auf den enorm Blei-belasteten Böden aus der Okeraue (über 2000 mg/kg TS) können in unseren Versuchen die Futtermittelgrenzwerte für Blei (10 mg/kg) problemlos eingehalten werden. Gleiches gilt übrigens für alle untersuchten Pflanzen.

Tabelle 3-26: Bleigehalte der Weizensorten im Topfversuch.

Sorte	Minimal mg / (kg TS)	Median mg/ (kg TS)	Maximal mg/ (kg TS)
SHW Duramar	0,25	0,51	1,54
WW Mulan	0,06	0,22	0,57
WW Isengrain	0,11	0,3	0,67

Sortenunterschiede in der Gerste

Es wurden die Wintergerstensorten Souleyka, Christelle und Malwinta getestet. Hier ließ sich keine sortenspezifische Reihenfolge in den Cadmiumgehalten über die zehn verschiedenen Versuchsstandorte hinweg feststellen (Abbildung 3-51). Die Auswahl müsste um weitere Sorten erweitert werden.

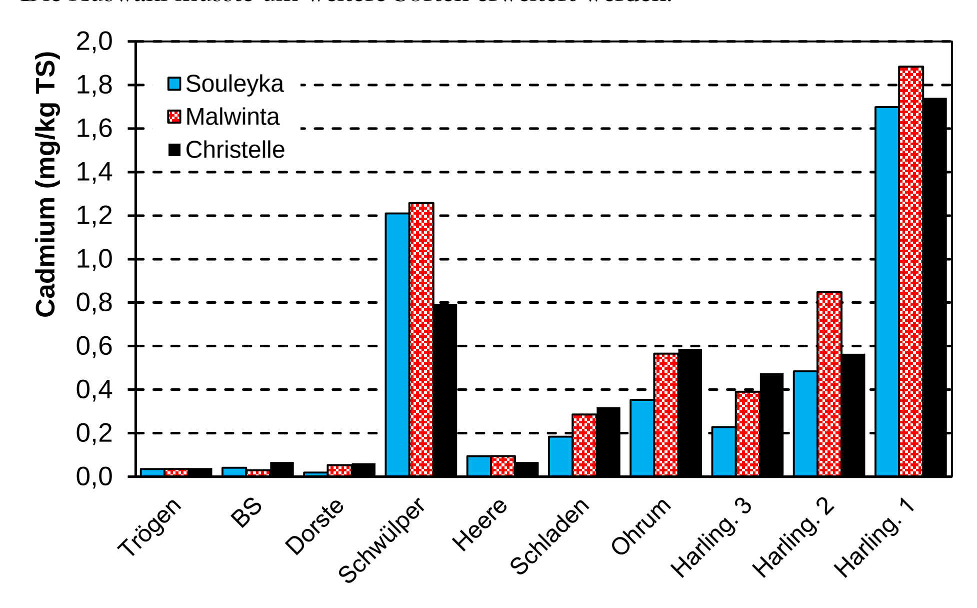


Abbildung 3-51: Cadmiumgehalte (in mg/kg TS) der getesteten Gerstensorten auf den 10 Standorten.

Sortenunterschiede im Roggen

Roggen wird schon jetzt häufig als Winterfrucht im Biogassektor begleitend zur Sommerkultur Mais eingesetzt. Es wurden folgende Sorten getestet: Winterroggen Allawi, Askari, Minello, Protector und Vitallo. Die stärkste Cadmiumanreicherung

zeigte Minello, die schwächste Vitallo (Abbildung 3-52). Zwischen diesen beiden Sorten liegt etwa der Faktor 4.

Die Erkenntnis, dass eine derart unterschiedliche Schadstoffakkumulation auf der Sorteneben zu beobachten ist, überrascht völlig. Die oben genannte Erkenntnis der Cadmiumgehaltreihenfolge Roggen < Gerste < Weizen ist seit Jahren bekannt. Würde z. B. ein Landwirt mit gutem Vorsatz von Weizen auf Roggen umstellen so wäre er mit der Roggensorte Vitallo sehr gut beraten. Wählt er aber Roggen Minello aus, so wäre er besser bei der Weizensorte Mulan oder Duramar geblieben – durch die Umstellung auf Roggen Minello würde er sogar den Cadmiumgehalt in seinem Erntegut erhöhen. In Deutschland sind in der Beschreibenden Sortenliste vom Bundessortenamt (2013) derzeit (Herbst 2013) 127 Weizensorten eingetragen, hinzukommen etliche Sorten aus anderen EU-Ländern, die in Deutschland vertriebsfähig sind. In diesem Forschungsprojekt konnte also lediglich ein erster Nadelstich zur unterschiedlichen Schadstoffanreicherung auf der Sortenebene gesetzt werden. Weitere Untersuchungen sollten folgen, um dem Landwirt eine tatsächliche Entscheidungsunterstützung zu geben.

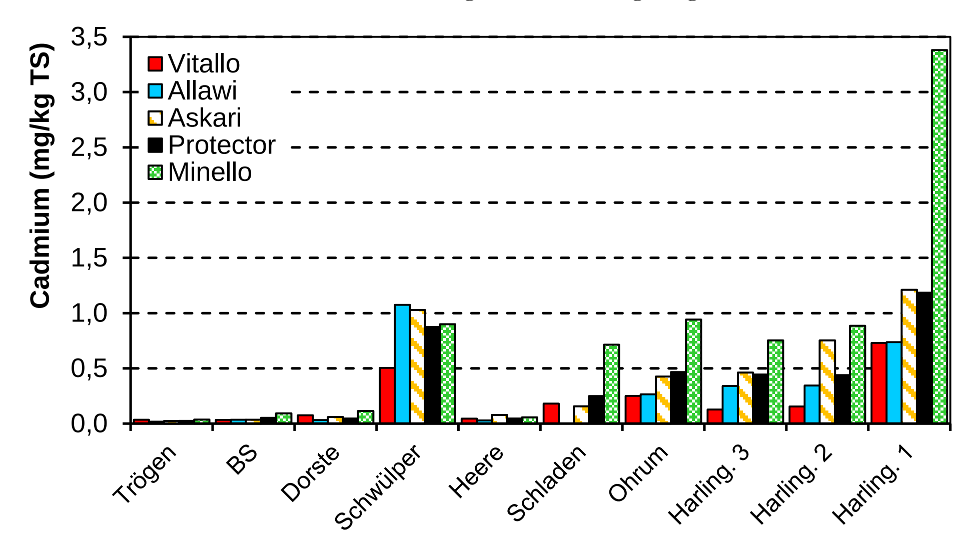


Abbildung 3-52: Cadmiumgehalte (in mg/kg TS) der getesteten Roggensorten auf den 10 Standorten.

Triticale

Im Topfversuch wurde nur eine Sorte angebaut (Wintertriticale Tulus). Die Cadmiumgehalte der Wintertriticale Tulus zeigen ähnliche Gehalte wie die höchstakkumulierende Roggensorte Minello.

Sortenunterschiede im Mais

Die kultivierten Maissorten waren Padrino, Amadeo, Ronaldinio, Sulexa, Simao und Revolver. Die Sorten Amadeo und Revolver verfügen über die höchsten Cadmiumgehalte auf den Standorten des Versuches (Abb. 3-53) und sollten daher auf Cadmium-belasteten Standorten vermieden werden. Zu empfehlen sind die Sorten Padrino und Simao aufgrund ihrer geringen Cadmiumaufnahme.

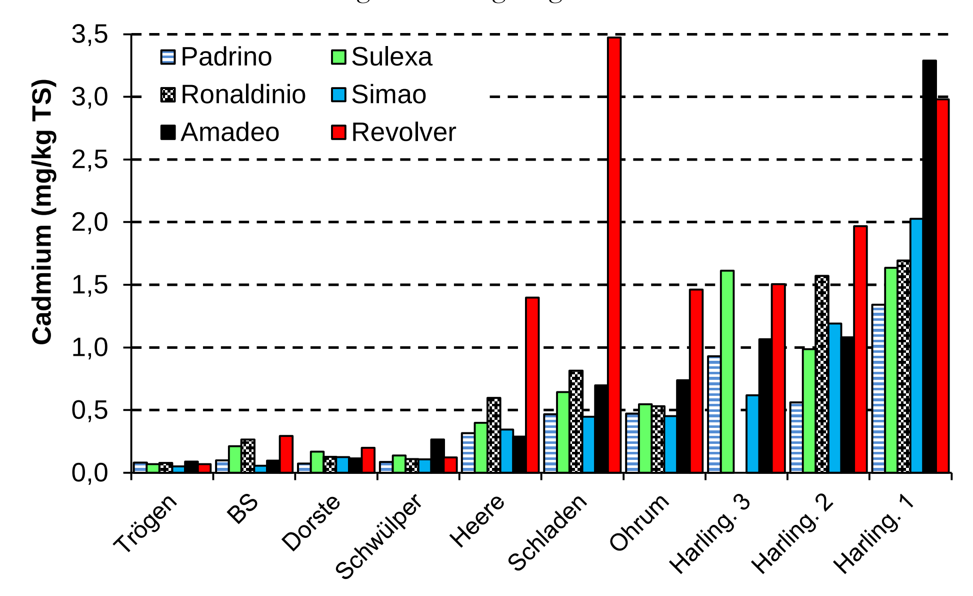


Abbildung 3-53: Cadmiumgehalte (in mg/kg TS) der getesteten Maissorten auf den 10 Standorten.

Sortenunterschiede bei Zucker- und Energierüben

Die Rübensorten Belladonna und Kyros wurden auf fünf Standorten des Projektes getestet. Zwischen diesen beiden Sorten gab es keinen klaren Trend. In unseren Untersuchungen wurde deutlich, dass sich die Schwermetalle in Rübenpflanzen sehr stark im Rübenblatt anreichern. Dementsprechend sollte dieses nicht verfüttert werden. So erreichte das Rübenblatt zum Beispiel selbst am nicht belasteten Standort Trögen 3,5 mg/kg TS Cadmium bei nur 0,3 mg/kg Cadmium im Boden.

Raps

Es wurde nur die Rapssorte Elektra im Topfversuch überprüft. In stärker belasteten Böden mit mehr als 6 mg/kg Cadmium liegen die Gehalte deutlich über denen vom Weizen. Auf dem Boden Harlingerode 3 mit 13 mg/kg Cadmium erreicht die oberirdische Pflanze 1,29 mg/kg Cadmium.

3.10.3.4 Effekt der Gärrestdüngung auf die Schadelementmobilität

Am Standort Harlingerode 2 wurde auf Kleinparzellen im Freiland ein Gärrestdüngungsversuch durchgeführt. Eine Hälfte der Versuchsparzellen wurde mit 5 Liter Gärrest der Biogasanlage Jühnde pro Quadratmeter gedüngt. Im Durchschnitt zeigten die Gärrest-gedüngten Pflanzen reduzierte Cadmiumgehalte gegenüber den konventionell gedüngten Wintergetreiden mit Ausnahme beim Winterweizen Mulan und der Wintergerste Christelle (Abbildung 3-54). Hier könnte es sich allerdings um einen standortbedingten Effekt am Rande der Parzelle handeln.

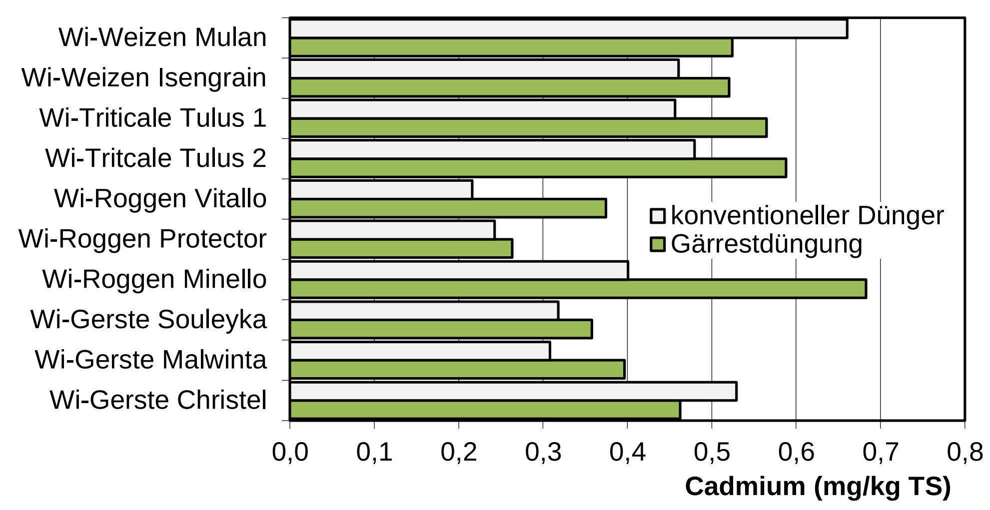


Abbildung 3-54: Auswirkungen einer Gärrestdüngung von 5 l/m² auf die Cadmiumgehalte in den Pflanzen (Freilandversuchsfeld Harlingerode 2; 15 mg/kg Cadmium, pH=7,0).

3.10.3.5 Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Auf stark belasteten Flächen bietet sich auch die Produktion von Holz als Energieträger an. Im Konzept Kurzumtriebsplantagen (KUP) werden schnellwachsende Baumarten auf Ackerstandorten angepflanzt. Diese können in Rotationen von etwa drei bis fünf Jahren beerntet werden und treiben anschließend wieder aus. Erntet man mindestens einmal innerhalb von 20 Jahren, so bleibt der Ackerstatus mit Dauerkultur erhalten. Für dieses System sind in Deutschland aktuell folgende Baumarten zugelassen: Pappel, Weide, Robinie, Erle, gemeine Esche, Birke, Stiel-, Trauben- und Roteiche.

Im Projekt wurden 2009 in Böden von fünf belasteten Standorten im Topfversuch vier verschiedene Bäumchen als Steckling gepflanzt (Pappel und Weide) bzw. als kleiner Setzling gepflanzt (Robinie und Schwarzerle). Im Winter 2012/13 wurden diese geerntet und untersucht. Als weiteres mögliches Brennmaterial wurde Miscanthus 2010 und 2011 kultiviert und beprobt. Die Cadmiumgehalte über alle

Standorte hinweg steigen in folgender Reihung: Robinie < Erle < Miscanthus < Pappel < Weide (Abbildung 3-55). Der Unterschied zwischen Robinie oder Erle gegenüber der Weide beträgt etwa Faktor 30. Im Topf Dorste konnte keine Weide geerntet werden.

Die Erträge von Robinie (4-10 t/ha*a) und Erle (3-8 t/ha*a) liegen nach aktuellem Stand der Züchtung je nach Standort meist deutlich unter denen von Pappel und Weide (circa 12 t/ha*a) (Biertümpfel et al. 2009; Geyer 1989). Bei der hohen Cadmiumanreicherung insbesondere bei den Weiden gerade bei belasteten Standorten ist aber mit stark erhöhten Emissionen bei der Verbrennung zu rechnen (siehe Kap. 3.11). Als Hochertragskultur ist von den Emissionen her die Pappel der Weide vorzuziehen, da Pappeln weniger Cadmium aufnehmen. Wenn möglich, sollten auf belasteten Standorten die deutlich niedriger akkumulierenden Robinien oder Erlen angebaut werden.

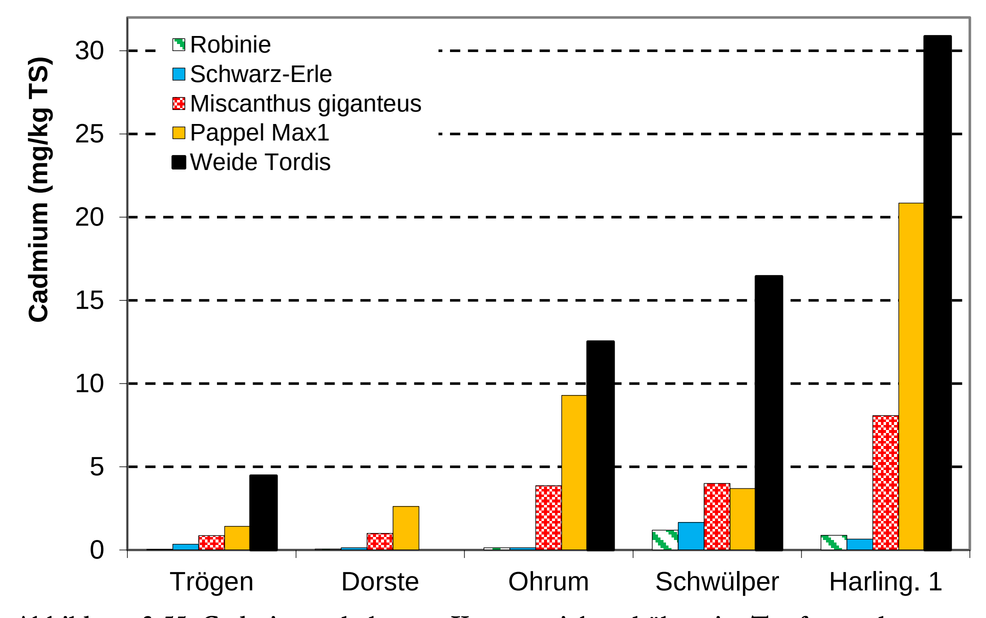


Abbildung 3-55: Cadmiumgehalte von Kurzumtriebsgehölzen im Topfversuch.

Bei allen Baumarten sind die Schadelemente in der Rinde gegenüber dem Holz stärker konzentriert. Bei längeren Umtriebszeiten wird das Verhältnis zwischen Rinde und Holz etwas günstiger und die Gesamtgehalte sinken etwas ab. Man sollte bei belasteten Standorten demnach möglichst lange Umtriebszeiten wählen. Bei oberflächennaher Kontamination (nur die Ackerkrume) wie z. B. in Harlingerode ist zu hoffen, dass die Wurzeln ab dem 3. Standjahr auch in die tieferen weniger belasteten Horizonte eindringen, damit weniger Schwermetall akkumulieren und dann eventuell weniger belastetes Holz liefern.

3.10.3.6 Prognose der zu erwarteten Cadmiumgehalte im Erntegut

Landwirte vor Ort mit belasteten Flächen wissen zum Teil aus langjähriger Erfahrung, welche Feldfrüchte sie auf welchen Schlägen noch anbauen können oder vermeiden müssen. Bei Verdacht auf belastetes Getreide wurde bislang das Erntegut untersucht und dann aufgrund der Ergebnisse entschieden, ob es in den Verkehr gebracht werden darf. Eine aussagekräftige Methode, mit der sich über eine Bodenansprache Schadelementgehalte im Erntegut bereits vor der Aussaat prognostizieren lassen, fehlt bislang. Am oben genannten Beispiel Schwülper und Heere wird klar, dass der Gesamtgehalt eines Schadelementes im Boden nur manchmal eine gute Ausgangsbasis für eine Prognose der Schadelementgehalte in den Pflanzen darstellt. Zu viele andere Bodenparameter bestimmen mit über den pflanzenverfügbaren Anteil eines Elementes. In diesem Projekt wurde daher die Methode der Ammoniumnitratextraktion mit dem Bodenmaterial angewandt (nach DIN ISO 19730). Dabei erhält man den potenziell mobilen Anteil der Schadelemente Cadmium, Thallium, Zink, Kupfer und Eisen im Boden.

In den Abbildungen 3-56 und 3-57 ist der Zusammenhang zwischen den Cadmiumgehalten in der Sonnenblume Salut und den Roggensorten Minello und Vitallo gegen die Ammoniumnitrat-löslichen Cadmiumwerte im Boden dargestellt. Über die zehn Standorte hinweg korreliert der Cadmiumgehalt in den Pflanzen recht gut mit den extrahierbaren Cadmiumgehalten im Boden. Anhand der Trendlinie der Abbildung 3-57 darf nun in einem Denkbeispiel eine Prognose gewagt werden:

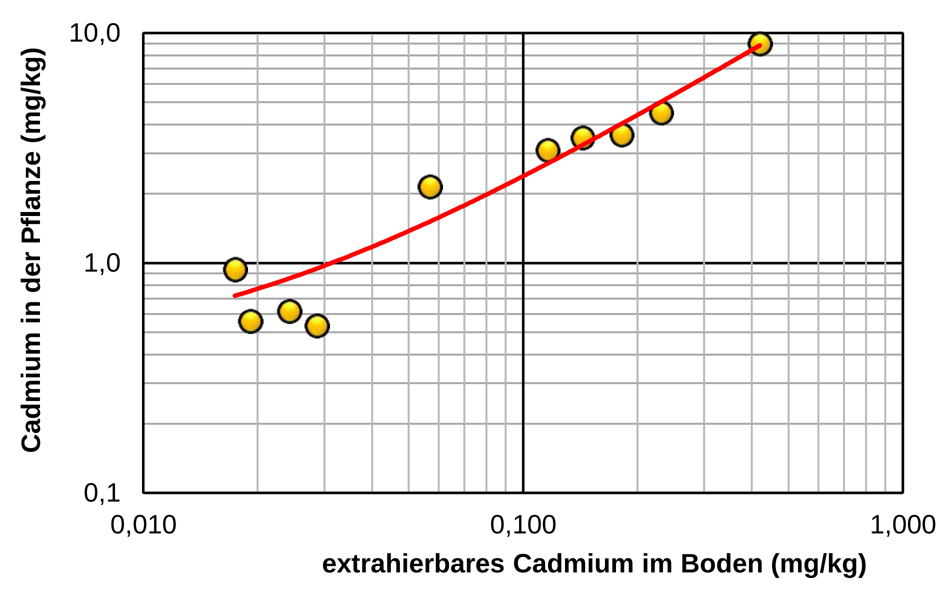


Abbildung 3-56: Cadmiumgehalte in der Sonnenblume Salut in Abhängigkeit vom Ammoniumnitrat-extrahierbaren Cadmiumgehalte der verschiedenen Böden in mg/kg TS (logarithmische Skala).

Ein Landwirt hat vor zwei Jahren eine Fläche neu gepachtet und kürzlich erfahren, dass diese wahrscheinlich schwermetallbelastet ist. Er schickt eine Bodenprobe in das Untersuchungslabor, wo in wenigen Tagen eine Ammoniumnitratextraktion und die Elementbestimmung durchgeführt werden. Ein extrahierbarer Cadmiumgehalt von 0,25 mg/kg wird festgestellt. Mit Blick auf Abbildung 3-57 kann man prognostizieren, dass im Roggen Vitallo etwa ein Cadmiumwert von 0,4 im Erntegut zu erwarten ist. Dieser Roggen dürfte demnach verfüttert werden. Die Prognose für Roggen Minello ergäbe einen Cadmiumgehalt von etwa 1,7 mg/kg im Erntegut. Dieser Roggen würde deutlich über dem zugelassenen Wert von 1 mg/kg Cadmium in Futtermitteln liegen.

Bei diesem Beispiel ist zu bedenken, dass die für die Abschätzung benötigten Wertepaare für den Boden und die jeweilige Pflanzenart bzw. -sorte noch unzureichend sind und erheblich mehr Daten in die Grafik zur Absicherung der Prognosen einfließen müssten. Wird dieser Forschungsbedarf befriedigt, könnte mit diesem Ansatz in Zukunft Landwirten und Beratern eine wichtige Entscheidungshilfe angeboten werden.

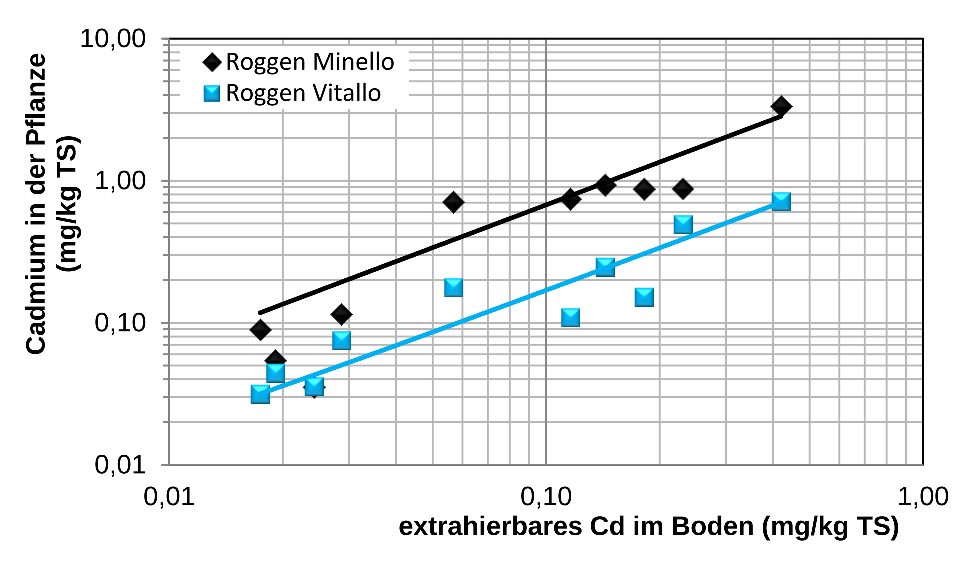


Abbildung 3-57: Cadmiumgehalte in den Roggensorten Minello und Vitallo in Zusammenhang mit dem extrahierbaren Cadmiumgehalt im Boden in mg/kg TS (logarithmische Skala).

3.10.3.7 Abschätzungen zur Phytoremediation

Im Folgenden soll berechnet werden, ob mit Hilfe schwermetallakkumulierender Nutzpflanzen ein belasteter Boden saniert werden kann (s. Abb. 3-58). 1 Hektar (1 ha = 10.000 m^2) Boden bis in 0,3 m Tiefe wiegt etwa 4.500 Tonnen (bei einer Dichte von 1,5 g/cm^3 = 1,5 t/m^3). Der Boden am Standort Ohrum mit 12,8

mg/kg (= 12,8 g/t) Cadmium enthält bis in 30 cm Tiefe also 57,6 kg Cadmium pro ha. Die Akkumulatorpflanze Amarant mit einem Cadmiumgehalt von 9,1 mg/kg und einem sehr hoch geschätzten Ertrag von 12 t TS/ha entzieht 109 g Cadmium pro ha und Jahr. Eine Ganzpflanzenernte von Winterweizen mit einem Cadmiumgehalt von 0,88 mg/kg und einem Ertrag von 15 t TS/ha entzieht zusätzlich 13,2 g Cadmium pro ha und Jahr. In der Summe würden dem Boden von den 57,6 kg Cadmium in einem Jahr lediglich 0,122 kg pro ha entzogen. Wäre der Verlauf des Entzuges über die Jahre gleich, so würde es etwa 500 Jahre dauern, um den Cadmiumgehalt auf natürliche Gehalte von 0,2 mg/kg zu senken. Allerdings würde unter realistischen Bedingungen im Laufe der Jahre immer weniger Cadmium entzogen, da im Boden der Gesamtvorrat an Cadmium sinkt. Der Entzug würde also eher einer exponentiellen Abnahme folgen. Wird dieser Abnahme mit in die Berechnungen einbezogen, so würden 1200 Jahre benötigt, bis der Cadmiumwert im Boden auf 1 mg/kg sinkt, und 2000 Jahre bis zum Erreichen des natürlichen Hintergrundwertes. Ebenfalls zu bedenken ist, dass Cadmium eines der mobilsten Elemente ist, die Remediation also „zügig“ geht. Für das Element Blei beispielsweise würde die Phytoremediation um Größenordnungen länger dauern. *Schlussfolgerung*: Phytoremediation für Schwermetalle ist äußerst langwierig. Ein zusätzliches Problem ist, wie die belasteten Materialien entsorgt werden können.

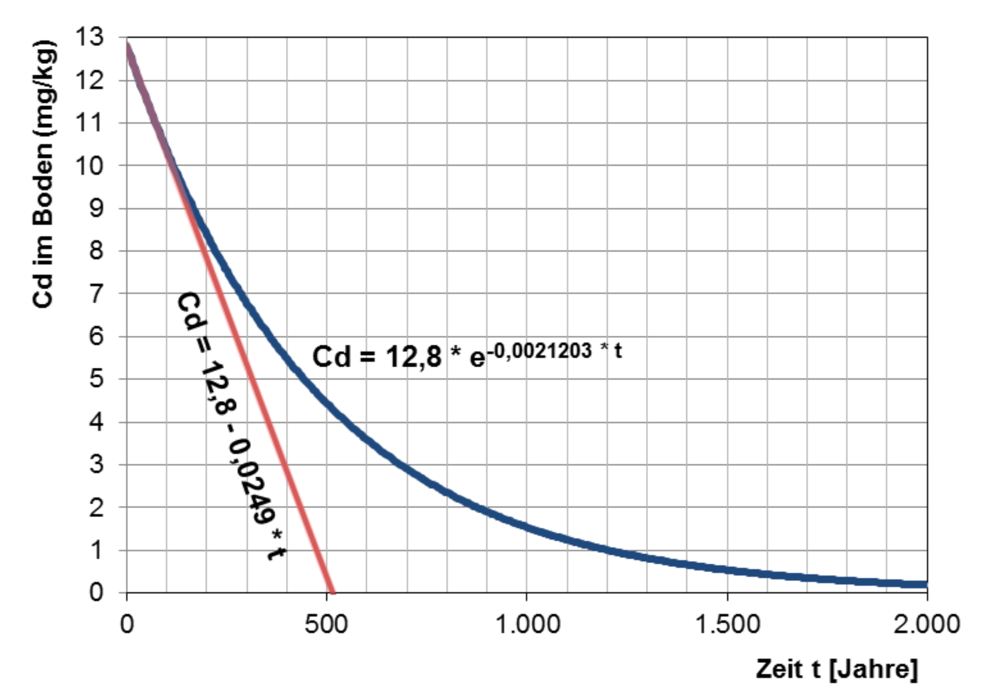


Abbildung 3-58: Mit der Zeit durch Phytoremediation mit Amaranth und Winterweizen zu erwartender linearer und exponentieller Abfall der Cadmiumgehalte im belasteten Boden von Ohrum (Annahmen im Text).

3.10.4 Schlussfolgerungen für die Praxis und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse zeigen, dass kontaminierte landwirtschaftliche Ackerstandorte zur Produktion von Energiepflanzen benutzt werden können. Im Folgenden sind Handlungsempfehlungen für Landwirte, Regionalplaner, Berater und andere Interessierte für eine bioenergetische Nutzung dieser Standorte zusammengefasst:

- Die spezifischen Eigenschaften der Böden inklusive Düngung und der Pflanzen bestimmen die Schwermetallaufnahme der Pflanzen.
- Auf stark belasteten Standorten sollten niedrigakkumulierende Kulturarten angebaut werden.
- Der pH-Wert ist eine der wichtigsten Einflussgrößen bei der Schwermetallaufnahme in die Pflanzen. Ein Absinken unter pH 5 sollte vermieden werden (Negativbeispiel: Standort Schwülper).
- Wenn möglich, sollten die Ursachen der Belastung recherchiert werden, da sie einen Hinweis auf die Verfügbarkeit der kritischen Elemente geben können.
- Eine Verunreinigung des Erntegutes mit Bodenmaterial ist zu vermeiden: Ist dieses kontaminiert, können die Gehalte von Schadelementen (z.B. Blei) stark steigen, auch wenn sie physiologisch kaum aufgenommen werden.
- Bei Getreide ist zu beachten: Der Cadmiumgehalt nimmt zu in der Reihe Roggen < Gerste < Weizen. Ebenso steigt der Cadmiumgehalt in der Folge Korn < ganze Pflanze < Stroh.
- Einzelne Sorten einer Getreideart können mehr Cadmium anreichern als andere. Bei ungünstiger Sortenwahl kann es zu erhöhten Cadmiumgehalten kommen.
- Sowohl bei der Futtermittelnutzung als auch bei der Nutzung von Gärsubstraten als Wirtschaftsdünger ist vor allem Cadmium das kritische Element, bei dem die Grenzwerte relativ schnell überschritten werden können (Grenzwerte: FuttMV: Cd 1,0, DüMV: Cd 1,5 mg/kg,).

Wenn geeignete nichtakkumulierende Pflanzenarten und Sorten verwendet werden, ist Anbau von Energiepflanzen eine lukrative Anbaualternative für schwermetallbelastete Standorte.

Literatur

Ad-Hoc-AG Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung.* 5. Auflage, Hannover.

Biertümpfel, A., Rudel, H., Werner, A &Vetter, A. (2009). *15 Jahre Energieholzversuche in Thüringen*. Gesichtet am 25.11.2013: http://www.tll.de./ainfo/pdf/ehol1009.pdf

Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) (1998). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Bundes-Bodenschutzgesetz

vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 30 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).

Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).

Bundessortenamt (2013). *Beschreibende Sortenlisten.* Gesichtet am 11.11.2013: http://www.bundessortenamt.de/internet30/index.php?id=164

Deicke, M & Ruppert, H. (2013). Bergbau- und Umweltgeschichte des Oberharzes. *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.* 95, 259–288.

DIN ISO 19730 (2009). *Bodenbeschaffenheit - Extraktion von Spurenelementen aus Böden mit Ammoniumnitratlösung (ISO 19730:2008).* Beuth-Verlag, Berlin.

DIN ISO 10390 (2005). *Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes (ISO 10390:2005).* Beuth-Verlag, Berlin.

Düngemittelverordnung (DüMV) vom 05.12.2012: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482).

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2002). *Richtlinie 2002/32/EG vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung.*

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016). Basisdaten Bioenergie Deutschland 2016. 52 S. Gesichtet am 31.11.2016: http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_20162.pdf

Futtermittelverordnung (FuttMV) (1981). *Futtermittelverordnung* in der Fassung vom 08. April 1981. BGBI I, (L), 1–110; in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. Juli 2013 (BGBl. I S. 2242).

Geyer, W. A. (1989). Biomass yield potential of short-rotation hardwoods in the Great Plains. *Biomass* 20(3-4), 167-175.

Göhler, H. & Emmerling, C. (2007). *Landwirtschaftliche Verwertung von Gärrückständen aus NaWaRo-Biogasanlagen.* Endbericht, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, FKZ 22011201. Gesichtet im März 2014: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22011201.pdf

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants.* 4. ed., Boca Raton CRC Press Taylor and Francis Group.

Klärschlammverordnung-AbfKlärV vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 12 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).

Knappe F., Möhler S., Ostermayer K., Lazar S. & Kaufmann C. (2008). *Vergleichende Auswertung von Stoffeinträgen in Böden über verschiedene Eintragspfade.* Texte 36/08, Umweltbundesamt, Dessau, 410 S.

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2006). *Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln.*

LWK Niedersachsen (2011). *Anbauempfehlungen für schwermetallbelastete Böden zur Gewährleistung der Lebensmittel- und Futtermittelqualität.* Oldenburg. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/betriebumwelt/nav/196/article/16643.html

Sauer, B. (2010). Elementgehalte und Stoffströme bei der Strom- und Wärmegewinnung im Bioenergiedorf Jühnde. Fortschritt neu denken 2, 124 S.; ISSN 2190-7722; Göttingen

Sauer, B., Ruppert, H. (2013). Bioenergy production as an option for polluted soils - A non-phytoremediation approach. In: Ruppert, H., Kappas, M., Ibendorf, J. (Hrsg.): *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach.* S. 425-444, Springer, Dordrecht.

3.11 Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Holz, Stroh und Biogas

Torben Seidel, Jürgen Orasche, Tino Pasold, Hans Ruppert

3.11.1 Problembeschreibung

In Deutschland existieren in etwa 14 von ~40 Mio. Haushalten Kleinfeuerungsanlagen für das Verbrennen von Festbrennstoffen wie Kohle und Holz (Struschka et al. 2008). In Hinblick auf die angestrebte Verminderung des Treibhauseffektes und die Abhängigkeit von knapper werdenden fossilen Energiequellen wird feste Biomasse als ein alternativer Energieträger zukünftig eine wesentliche Rolle spielen. Allerdings kann ein wachsender Beitrag von Festbiomasse zur Wärmeerzeugung aufgrund erhöhter Emissionen von anorganischen und organischen Substanzen auch einen negativen Einfluss haben.

Nicht alle Kleinfeuerungsanlagen tragen in gleichen Teilen zu den Feinstaubemissionen bei. Etwa 98 % der Einzelraumfeuerungsanlagen, wie Kaminöfen, emittieren 84 % des Feinstaubes, die restlichen 16 % werden von den 2 % Zentralfeuerungsanlagen, wie Hackschnitzel- oder Scheitholzkessel, emittiert (Mantau & Sörgel 2006; Merten et al. 2004; Struschka et al. 2003). Circa 90 % der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen entstehen durch die Verbrennung von Holz. 7,7 % stammen aus der Verbrennung von Kohle, 2,4 % aus Verbrennung von Öl und nur 0,13 % aus der Verbrennung von Gas (s. Abb. 3-59; UBA 2017)

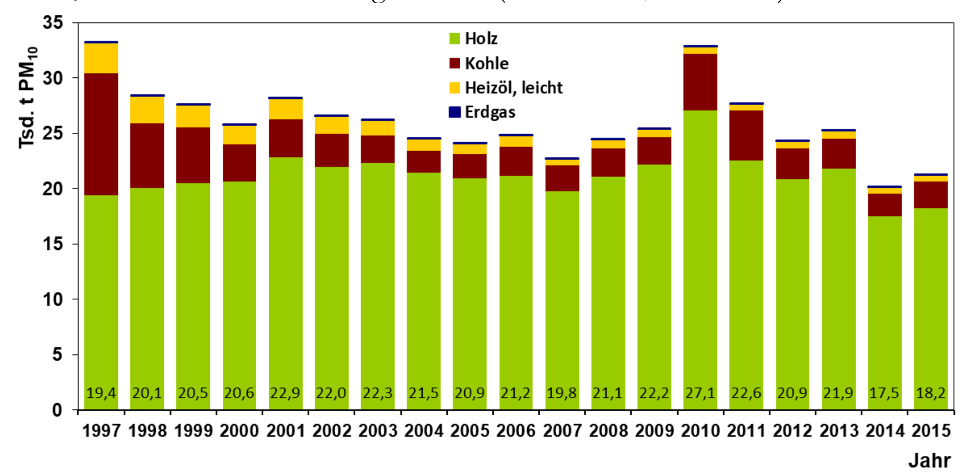


Abbildung 3-59: Feinstaubemissionen in 1000 t PM_{10} (= particulate matter < 10 µm = Feinstaubpartikel mit einem Korndurchmesser <10 µm) aus Kleinfeuerungsanlagen in Deutschland zwischen 1997 und 2015. Die Zahlen im grünen Bereich zeigen die bei der Holzverbrennung jährlich emittierten Mengen (Daten von UBA 2017).

Aus Abbildung 3-59 geht auch hervor, dass bis zum Jahr 2010 die Feinstaub emissionen aus der Holzverbrennung zunehmen und dann bis 2015 abnehmen, obwohl die Intensität der Holzverbrennung erheblich zugenommen hat – ein Hinweis darauf, dass Emissionsschutzmaßnahmen allmählich wirken.

Die unterschiedlichen Feuerungsanlagen mit ihren spezifischen Feuerungsprinzipien emittieren bauartbedingt unterschiedliche Gesamtstaubmengen. So setzen manuell beschickte Kaminöfen mit einer chargenweisen Beladung des Feuerraumes, Naturzug und ungeregelter Luftzufuhr wesentlich höhere Staubmengen frei als automatisch beschickte Kleinfeuerungsanlagen, in welchen meist bessere Feuerungsprinzipien wie der untere Abbrand, die Unterschub- oder Abwurffeuerung, ein kontinuierlicher Brennstoffdurchsatz, die Regelung der Primär- und Sekundärluftzufuhr usw. realisiert sind.

Neben der Feuerungskonstruktion und dem jeweiligen Verbrennungsprinzip bestimmen auch der eingesetzte Brennstoff und das Verhalten des Nutzers die Emissionen einer Anlage. Wichtig sind die Güte und Art des Brennstoffes, seine Eignung für die Anlage und sein Wassergehalt, aber auch die Wartung, Reinigung und eine angepasste Leistungsregelung der Anlage (Lenz 2012). Neben diesen Maßnahmen sind auch Sekundärmaßnahmen wie Staubminderungsmaßnahmen in Form elektrostatischer Abscheider (EA) und Kondensationswärmetauscher (KWT) geeignet.

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Holz und halmartiger Brennstoffe ist neben den heutigen, teilweise hohen Emissionen durch die Nutzung von älteren Anlagen (Lenz 2010) sowie durch höhere Emissionen im Winter (Pio et al. 2007; Simpson et al. 2007; Tsyro et al. 2007) von einem weiteren Anstieg der Feinstaubbelastung aus Kleinfeuerungsanlagen und einer damit einhergehenden stärkeren gesundheitlichen Beeinflussung auszugehen, was zu Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung führen kann.

Die von den Feinstaubemissionen aus Biomassefeuerungen ausgehende Gesundheitsgefährdung ist nur abschätzbar. In Anbetracht der Menge und Zusammensetzung dieser Emissionen ist davon auszugehen, dass sie in ihrer Gesamtwirkung einen deutlich negativen Einfluss auf die menschliche Gesundheit ausüben, weshalb sie in den letzten Jahren weltweit stärker in das öffentliche Interesse gerieten. Zahlreiche epidemiologische Studien und Veröffentlichungen haben den Zusammenhang zwischen Feinstaubexposition und damit einhergehenden gesundheitlichen Risiken aufgezeigt (Dockery et al. 1982, 1989, 1993, 1996; Dockery 2001; Dockery & Stone 2007; Pope et al. 1991, 1995, 2006, 2009; Pope & Dockery 1992; Laden et al. 2006; Orozco-Levi 2006; Woodruff et al. 2004). Nach neueren Studien sind die Auswirkungen auf die Gesundheit inhalierter Feinstaubpartikel aus der Holzverbrennung mit einem Durchmesser kleiner als 2,5 µm, die sogenannten $PM_{2,5}$ (particulate matter <2,5 µm bzw. 0,0025 Millimeter) vermutlich gefährlicher als bislang angenommen (Boman et al. 2003; Naeher et al. 2007; Kasurinen et al. 2017).

Die Relevanz der Feinstaubpartikel wird u.a. durch ihre Größe, Anzahl, Zusammensetzung und Reaktivität bestimmt. Besonders die Anlagerungen gesundheitsrelevanter Substanzen an den Feinstaub wie z.B. Schwermetalle und andere Schadelemente, Säuremoleküle, elementarer Kohlenstoff und insbesondere organische Schadverbindungen aus nicht komplett verbranntem Kohlenstoff wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder Dioxine und Furane (PCDD/F) sind zu erwähnen (Katsouyanni 2003; Kennedy 2007; Lighty et al. 2000; Sippula 2010). Bei einer vollständigen, optimalen Verbrennung von Pflanzenmaterial bestehen die Verbrennungsprodukte aus CO_2, H_2O und löslichen anorganischen Komponenten, wie Chloriden, Sulfaten und Nitraten der Elemente Kalium und Calcium sowie Silikaten des Elements Kalium (Christensen et al. 1998; Ferge et al. 2005; Sippula et al. 2007; Tissari et al. 2008), die allerdings gesundheitlich und ökologisch eher unbedenklich sind. Läuft die Verbrennung von Biomasse jedoch nicht optimal ab, können im Abgas Feinstäube entstehen oder sich durch Kondensation bilden, welche neben den Elementen eine breite Palette an organischen Schadstoffen enthalten. Deren Menge und Zusammensetzung hängt, wie erwähnt, sehr stark von den Verbrennungsbedingungen (Art der Verbrennungsvorrichtung; Luftüberschuss und Temperaturen in der primären Verbrennungszone, der Reduktionszone und der Nachbrennkammer; Abgaszirkulation) und von der Art und Güte des Brennstoffs (Korngröße, Rindenanteil, Zusammensetzung und Feuchtegehalt) ab (Andersson & Marklund 1998; Ferge et al. 2005; Oser 2003; Boman et al. 2011; Pettersson et al. 2011; Orasche et al. 2013).

Neben der Zusammensetzung wird auch die Lungengängigkeit des Feinstaubs als wichtiger Faktor für die Gesundheitsgefährdung angesehen (Lighty et al. 2000; Oberdörster 1996). Die Feinheit der Aerosol-Partikel ist aufgrund des Eindringvermögens in die Lunge und des dort abgeschiedenen Partikelanteils entscheidend für das toxische Potenzial (Tabelle 3-27).

Tabelle 3-27: Begriffe für Feinstaubfraktionen und deren Gesundheitsgefährdungspotenzial (nach Lahl 2005)

Bezeichnung	Aerodynamischer Durchmesser [μm]	Humaneinwirkung	Gefährdungspotenzial
Schwebstaub	bis maximal 30	im Nasen- und Rachenraum herausgefiltert	begrenzt
Thorakaler Schwebstaub	< 10	in den oberen Atemwegen und zur Lunge	nachweisbare Gesundheitsbeeinträchtigung
Alveolengängiger Schwebstaub	< 2,5	lungengängig bis zu den Lungenbläschen	Lungen-, Herz-, Kreislauf-Erkrankungen
Ultrafeine Partikel	< 0,1	durch Lungenbläschen und Zellmembran direkt in den Blutkreislauf	zusätzlich Gehirn- und Herz-Erkrankungen

Zur Einschätzung der Relevanz der bei der Verbrennung von Biomasse auftretenden Emissionen werden diese nicht allein betrachtet, sondern sollten mit den bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehenden Emissionen verglichen werden.

3.11.2 Methoden

Auf Basis von fünf modernen Kleinfeuerungsanlagen wurde untersucht, inwieweit Schadstoffe beim Verbrennen von Holz und Stroh in die Atmosphäre entweichen und eine potenzielle Gefährdung darstellen. Zum Vergleich wurden eine Großfeuerungsheizanlage, die mit Holzhackschnitzeln betrieben wird, sowie ein mit Biogas betriebenes Blockheizkraftwerk untersucht. Betrachtet wurde auch, wie die Art und Form des Brennstoffes, die Anlagenart und das Nutzerverhalten die Emissionen an Schadstoffen bestimmen. Zur Relativierung werden bezogen auf den Energieertrag die Schadelementemissionen bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe denen der Kohle- und Ölverbrennung gegenübergestellt.

Während die Elemente aus Bilanzierungsgründen in allen Brennstoffen, den Aschen und sonstigen Verbrennungsrückständen untersucht wurden, erfolgte die Quantifizierung der organischen Bestandteile nur an den auf Filtern abgeschiedenen Feinstäuben, die in die Atmosphäre gelangen und die Umwelt belasten. Die einzelnen Verbrennungsexperimente wurden meist unter optimalen Volllastbedingungen durchgeführt.

Zur Verbesserung der Praxisrelevanz wurde in zusätzlichen systematischen Versuchen nicht-optimale Verbrennungbedingungen gewählt, um zu zeigen, wie sich die Schadstoffemissionen verändern. Im Einzelnen waren das der Einsatz von übertrocknetem Holz mit einem Feuchtegehalt von nur 2 %, Holz mit einem zu hohen Feuchtegehalt von 19 %, eine Luftmangeleinstellung (komplett geschlossene Luftzufuhr) und ein überladener Brennraum. Letztere Experimente wurden an einem Kaminofen durchgeführt, der für Volllastversuche eingesetzt wurde. Kaminöfen werden selten durchgehend unter Volllast betrieben, da die typische Nennleistung mit etwa 8 kW bereits deutlich zu hoch zum partiellen Heizen von Wohnräumen ist. Die Ergebnisse sind aber durchaus auf andere Anlagen übertragbar und zeigen die Trends auf, die beim Betrieb schlecht gewarteter Anlagen, beim Einsatz von Brennstoff minderer Qualität oder bei nicht ordnungsgemäßem Betrieb auftreten.

Des Weiteren wurde dem zunehmenden Absatz von Fichtenspäne-Briketts Rechnung getragen und deren Abbrand (ebenfalls mit reduzierter Luftzufuhr) dem Abbrand des Scheitholzes gegenübergestellt.

Elementanalysen

Die Probenahme und die Gasmessungen erfolgten an fünf ausgewählten Einzelfeuerungsanlagen und einer Zentralfeuerungsanlage am Feuerungsprüfstand des Technologie- und Förderzentrums im Kompetenzzentrum für Nachwachsende

Rohstoffe (TFZ) in Straubing (Abbildung 3-60). Nachfolgend wurden die Proben mit einem Totalaufschluss in Reinstapparaturen der Fa. Picotrace® mit reinstdestillierten Säuren komplett in Lösung gebracht und ihre Elementgehalte mit der ICP-OES und -MS (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry bzw. Mass Spectrometry) quantifiziert.

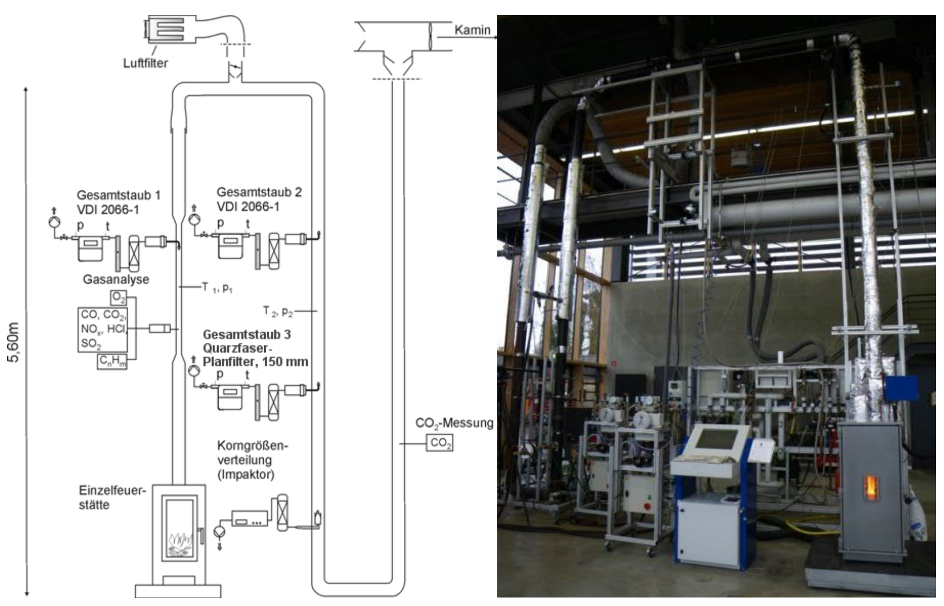


Abbildung 3-60: Skizzierter Aufbau des Verdünnungstunnels am Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) in Straubing nach Ellner-Schuberth et al. (2010) (links); Verdünnungstunnel am TFZ mit angeschlossenem Pelletofen (rechts)

Aus den Elementgehalten und den Mengen der Brennstoffe bzw. der einzelnen anfallenden Aschen wurden Stoffstrombilanzen für ausgewählte gesundheits- und umweltkritische Elemente erstellt. Theoretisch müssten die mit dem Brennstoff zugeführten Mengen eines Elementes (Quelle, Eintrag oder Input) identisch sein mit den Summen der in der Verbrennungsanlage abgeschiedenen plus der emittierten Elementmengen (Senken oder Output).

Zu den Senken gehören die Abscheidungen in der Verbrennungsanlage als *Rostaschen*, *Anhaftungen und Aschen am Wärmetauscher*, *Anhaftungen an der Feuerraumauskleidung* oder *Elementabscheidungen im Material der Feuerraumauskleidung* (meistens Schamottesteine), *Rückstände im elektrostatischen Abscheider (EA)*, *Kondensate im Sekundärwärmetauscher (SWT)* sowie *Anhaftungen im Abgasweg*. Nur ein kleiner Teil der Elemente gelangt als *staubförmige Emissionen* (Filter- oder Flugaschen) in die Atmosphäre. Einzelne Senken ließen sich teilweise nur mit großem Aufwand beproben, so dass bei den meisten Versuchen nur die gut zugänglichen Aschefraktionen sowie die Filterstäube gewonnen wurden (Abb. 3-61). Für die Bewertung der einzel-

nen Anlagen wurden jeweils berechnete energienormierte Emissionen ausgewählter umweltbedeutsamer Elemente verglichen, um sie dann später energienormierten Emissionen bei der Verbrennung von Öl und Kohle gegenüberzustellen.

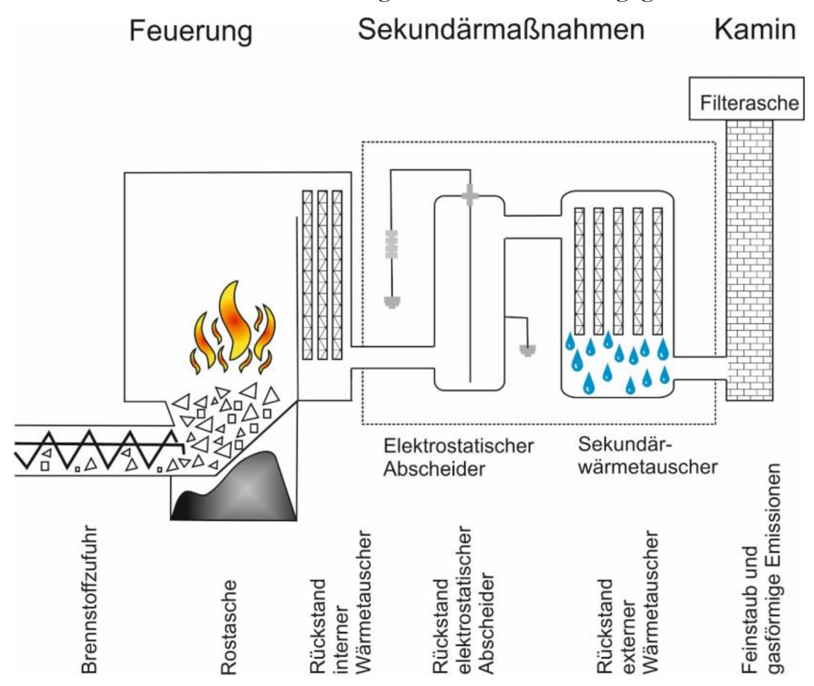


Abbildung 3-61: Schematische Darstellung des Bilanzierungsraumes: Input der Elemente über den Brennstoff (links), ihre Abscheidung in den verschiedenen Aschefraktionen sowie die Emission (Filterasche). Eventuelle Reaktionen mit der Brennraumauskleidung oder Abscheidungen an der Kaminrohrwandung oder sonstigen Oberflächen im Ofen sind hier nicht berücksichtigt

Organische Analysen

Zur Bestimmung der organischen Bestandteile in den auf den Filtern abgeschiedenen Feinstäuben wurde am Helmholtz Zentrum München eine neue Methode entwickelt, mit der polare und unpolare Verbindungen in einer Messung bestimmbar sind. Dabei überführt die sogenannte In-situ-Derivatisierung-Thermodesorption (IDTD) polare Substanzen, wie etwa Levoglucosan (ein wichtiger Marker für die Pyrolyse von Zellulose während der Holzverbrennung), in unpolare Derivate, die mit der Gaschromatographie-Time of Flight-Massenspektrometrie (GC-ToF-MS) identifiziert und quantifiziert werden können (Orasche et al. 2011).

Für die Bewertung der Feinstäube hinsichtlich einer Belastung mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) wurde ein Ansatz der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Belastung von Arbeitsplätzen mit PAK-haltigen Aerosolen adaptiert. Der Ansatz sagt aus, dass das Gesundheitsgefährdungspotenzial durch PAK im Aerosol als Summe dargestellt werden kann, indem

die Gehalte der einzelnen PAK mit ihrem spezifischen Toxizitätsäquivalentfaktor (TEF) multipliziert und zu einem Toxizitätsäquivalent (TEQ) addiert werden (DFG 2013). Auch hier wurden die Emissionen der Holzverbrennung mit denen von Ölbrennern verglichen. Hierzu wurde ein emittierter TEQ-Wert aus der Ölverbrennung mit Hilfe von Emissionsfaktoren aus der Literatur abgeschätzt (Miller et al. 1996; Rogge et al. 1997).

3.11.3 Schadstoffströme und Emissionen

3.11.3.1 Elementbilanzen

Alle untersuchten Biomasseverbrennungsanlagen waren auf dem neuesten Stand der Technik und hielten die gesetzlich festgelegten Typprüfungsgrenzwerte (Gesamtstaub und CO) sogar unter den vorherrschenden experimentellen Bedingungen ein, die häufig von normierten Typprüfungsversuchen abwichen.

Selbstverständlich beeinflusst die Elementkonzentration im Brennstoff die Emissionen eines Elementes. Beispielsweise unterschied sich Zink bezüglich der Konzentration im Brennstoff mit 2 - 24 mg/kg relativ stark (Elementgehalte aller Brennstoffe in Seidel et al. 2013). Tendenziell führte eine hohe Konzentration im Brennstoff zu einem hohen Massenstrom, wie an der Großfeuerungsanlage und dem Hackschnitzelkessel (Miscanthuspellets, Fichtenholzhackschnitzel) erkennbar war. Umgekehrt führte eine niedrige Konzentration im Brennstoff, wie beispielsweise bei Kupfer, zu einem geringen Massenstrom beim Kaminofen (Buchenscheitholz), Hackschnitzelkessel (Winterweizenstrohpellets) und beim Scheitholzkessel (Buchenscheitholz). Die Konzentrationen von Kupfer lagen in allen Brennstoffen im Bereich von 1 - 2 mg/kg. Eine Ausnahme mit ~5 mg/kg bildete Miscanthus, was sich direkt in einem hohen Massenstrom in der Nennlastphase äußerte. Auch die Konzentrationen in den Holzhackschnitzeln, die in der Großfeuerungsanlage eingesetzt wurden, lagen etwas höher als in den Brennstoffen der übrigen Anlagen, was wiederum einen erhöhten Massenstrom verursachte. Aus den Elementgehalten im Brennstoff und den einzelnen Aschefraktionen (Tabelle 3-28) sowie den Brennstoff- und Aschemengen lässt sich berechnen, wie viel Menge eines Elementes freigesetzt und wie viel jeweils in welcher Aschefraktion wiedergefunden wurde (Tabelle 3-29).

Theoretisch sollten die Mengen eines Elementes im Brennstoff und die Summe der Elementmengen in den einzelnen Aschefraktionen wie Rost-, Brennraum- und Flugaschen, gegebenenfalls auch Aschen im elektrostatischen Abscheider und am Sekundärwärmetauscher, im Rahmen der Schwankungen der Brennversuche ungefähr identisch sein. Allerdings ergeben Gesamtbilanzberechnungen anhand des Inputs durch den Brennstoff und des Outputs in die verschiedenen Sekundärprodukte, dass bei allen Brennversuchen gerade die umweltbedeutsamen Elemente wie Cadmium, Zink, Zinn, Thallium, Blei, Bismut oder Antimon viel zu geringe Wiederfindungen aufweisen (Tabelle 3-29 und Abbildung 3-62).

Tabelle 3-28: Elementgehalte (in µg/g) in Fichtenholzhackschnitzeln und in den verschiedenen Aschefraktionen bei Brennversuchen mit und ohne elektrostatischen Abscheider (EA) in der Feuerungsanlage Guntamatic Powerchip 20/30

Symbol	Element	Fichten-holzhack-schnitzel	Rost-asche	Asche auf internem WT	Asche auf EA	Filter-asche ohne EA	Filter-asche mit EA
Be	**Beryllium**	0,003	0,61	0,16	0,12	0,11	0,13
Bi	**Bismut**	<0,002	0,02	0,16	1,3	1,8	1,3
Cd	**Cadmium**	0,19	0,25	19,5	50	59	62
Co	**Cobalt**	0,41	18,6	6,5	4,3	3,3	11
Cr	**Chrom**	1,13	48	56	51	50	288
Cu	**Kupfer**	1,15	133	478	215	160	245
Mn	**Mangan**	90	20013	9098	2081	927	855
Mo	**Molybdän**	0,054	0,91	4,8	6,0	7,1	14,2
Ni	**Nickel**	0,70	81	48	31	27	135
Pb	**Blei**	0,29	1,6	42	249	214	232
S	**Schwefel**	63	3535	19254	68192	41771	30270
Sb	**Antimon**	<0,01	0,35	1,4	3,4	2,7	3,0
Sn	**Zinn**	0,017	0,88	2,9	5,3	6,1	6,3
Th	**Thorium**	0,0044	2,0	2,4	0,23	0	0
Tl	**Thallium**	0,019	0,03	2,5	19,1	15,6	16,9
U	**Uran**	0,0017	0,62	1,7	0,10	0,05	0,12
Zn	**Zink**	11,7	145	3900	10324	8096	9568

Da nicht klar war, ob eventuell Elemente durch die Quarzfaserfilter, die zur Abscheidung des Gesamtstaubes im Abgas eingesetzt wurden, entweichen, wurden systematische Abluftuntersuchungen hinter den Filtern durchgeführt. Dabei wurde die durch die Filter hindurchgegangene Luft zusätzlich durch Waschflaschen gesaugt und analysiert. Da sich in den Waschflaschen nur vernachlässigbare Elementmengen befanden, ist sicher, dass die fehlenden Elementmengen in den Feuerungsanlagen verbleiben und keinesfalls in die Atemluft gelangen.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich die nicht auffindbaren Elementmengen in den kühleren Zonen der Verbrennungsanlage, im Schornstein oder im Material der Feuerraumauskleidung abscheiden. Obwohl es sehr schwierig war, dort systematisch Proben zu entnehmen, wurde in zwei Fällen untersucht, ob in der aus Schamotte bestehenden Feuerraumauskleidung kritische Elemente akkumuliert sind, die Auskleidung also als Senke fungieren kann. In Hinblick auf teilweise erhebliche Überbefunde bei einigen Elementen wurde zudem untersucht, inwieweit umgekehrt das Auskleidungsmaterial die in den Aschen gefundenen Elementmengen erhöht. Überschlagsrechnungen zeigten, dass die Feuerraumauskleidung sowohl als Senke für umweltkritische Elemente dient als auch Quelle für solche Elemente ist, die typischerweise in Schamotte, aber kaum im Brennmaterial enthalten sind. Die Auskleidung kann dementsprechend die Ursache für nicht aufgehende Bilanzierungen sein.

Tabelle 3-29: Mengen umweltkritischer Elemente im Brennstoff Fichtenholzhackschnitzel und in den zugehörigen Aschefraktionen in µg beim Brennversuch in der Feuerungsanlage Guntamatic Powerchip 20/30; Berechnung der prozentualen Wiederfindung der Elemente sowie des prozentualen Anteils der Elemente im Filterstaub, bezogen auf den Brennstoff ohne EA (oben) und mit EA (unten)

Versuche ohne elektrostatischen Abscheider		Fichtenholzhackschnitzel	Rostasche	Asche auf EA (entfällt)	Asche auf internem WT	Filterasche	Summe der Elementmengen in Aschen	Wiederfindung in %	Elementanteil auf Filter in %
Brennstoff- bzw. Aschenmenge (g)		**103154**	**502**		**3,5**	**41**			
Be	**Beryllium**	306	305		1	5	311	102	1,6
Bi	**Bismut**	n.b.	10		1	76	87	n.b.	n.b.
Cd	**Cadmium**	19113	127		68	2372	2567	13	12,4
Co	**Cobalt**	42314	9359		22	128	9510	22	0,3
Cr	**Chrom**	116903	23931		194	2562	26688	23	2,2
Cu	**Kupfer**	118867	66613		1664	6430	74707	63	5,4
Mn	**Mangan**	9269054	10056033		31661	38726	10126420	109	0,4
Mo	**Molybdän**	5578	457		17	319	793	14	5,7
Ni	**Nickel**	72221	40672		166	913	41751	58	1,3
Pb	**Blei**	29735	804		145	8503	9452	32	29
S	**Schwefel**	6477968	1776116		67004	168027	3523390	54	26
Sb	**Antimon**	366	178		5	125	307	84	34
Sn	**Zinn**	1720	444		10	288	742	43	16,7
Th	**Thorium**	450	1014		8	2	1024	228	0,4
Tl	**Thallium**	1964	16		9	606	630	32	31
U	**Uran**	171	312		6	2	320	187	1,2
Zn	**Zink**	1209813	72894		13571	31411	400582	33	26

Versuche mit elektrostatischem Abscheider		Fichtenholzhackschnitzel	Rostasche	Asche auf EA	Asche auf internem WT	Filterasche	Summe der Elementmengen in Aschen	Wiederfindung in %	Elementanteil auf Filter in %
Brennstoff- bzw. Aschenmenge (g)		**80517**	**392**	**5,1**	**2,7**	**11**			
Be	**Beryllium**	239	238	1	0	1	241	101	0,6
Bi	**Bismut**	n.b.	8	6	0	13	28	n.b.	n.b.
Cd	**Cadmium**	14919	99	253	53	637	1043	7	4,3
Co	**Cobalt**	33028	7305	22	18	113	7457	23	0,3
Cr	**Chrom**	91249	18680	261	152	2951	22044	24	3,2
Cu	**Kupfer**	92782	51996	1094	1301	2637	57028	61	2,8
Mn	**Mangan**	7234973	7849421	10613	24747	9229	7894010	109	0,1
Mo	**Molybdän**	4354	357	30	13	118	518	12	2,7
Ni	**Nickel**	56372	31747	157	130	1452	33487	59	2,6
Pb	**Blei**	23210	627	1269	113	2354	4363	19	10,1
S	**Schwefel**	5056387	1386380	34777	52371	37551	2162047	43	7,4
Sb	**Antimon**	286	139	17	4	26	186	65	9,1
Sn	**Zinn**	1342	347	27	8	70	452	34	5,2
Th	**Thorium**	351	791	1	7	1	800	228	0,2
Tl	**Thallium**	1533	12	98	7	182	299	19	11,9
U	**Uran**	134	244	0	5	1	250	187	0,7
Zn	**Zink**	944322	56899	52654	10607	10010	220261	23	10,6

n.b. = nicht bestimmt

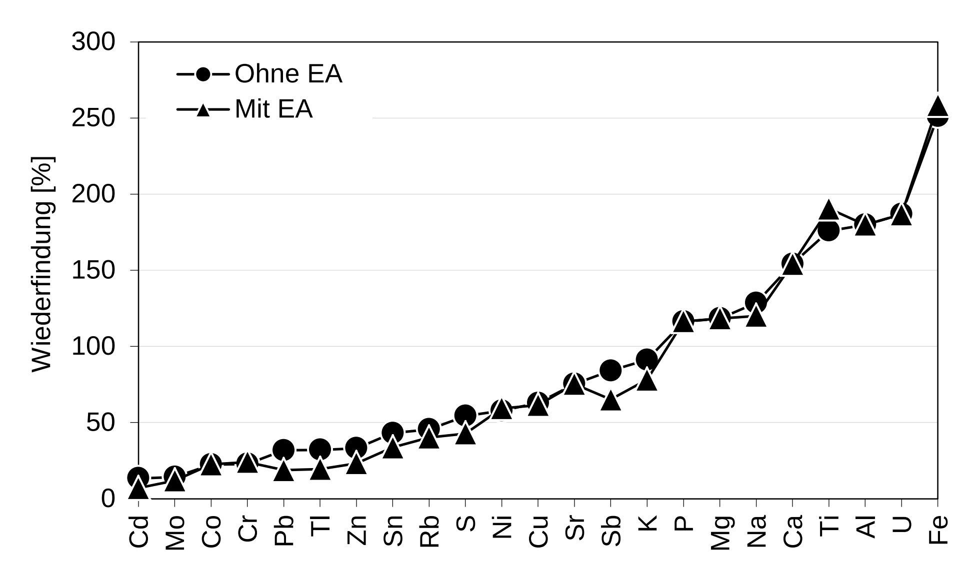


Abbildung 3-62: Prozentuale Wiederfindung ausgewählter Elemente ohne und mit elektrostatischem Abscheider (EA) beim Verbrennungsversuch in der Hackschnitzelfeuerungsanlage Guntamatic Powerchip 20/30; Feuerung mit Fichtenholzhackschnitzeln (verändert nach Seidel et al. 2013)

Die bei der Verbrennung der jeweils eingesetzten Brennstoffe (Fichten- bzw. Buchenscheitholz, Fichtenholzhackschnitzel, usw.) entstehenden Partikel sind aufgrund ihrer geringen Größe im Bereich von 0,08 - 0,8 µm gut lungengängig, wie die mit einem ELPI (Elektrical Low Pressure Impactor) durchgeführten Korngrößenanalysen offenbarten (Abbildung 3-63). Der Einsatz von Sekundärmaßnahmen wie elektrostatische Abscheider bzw. Sekundärwärmetauscher reduzierte die Partikelanzahl pro cm^3.

Der Partikeldurchmesser ist für das Eindringvermögen eines Partikels in die Lunge und die Partikelzusammensetzung für das toxische Potenzial relevant. Es ist also von großer Bedeutung, dass durch Sekundärmaßnahmen die Einträge von Elementen in die Außenluft reduziert werden. So nahm beispielsweise im Hackschnitzelkessel mit Fichtenholzhackschnitzeln die Cadmium-Emission von 0,002 auf 0,0006 mg/MJ, also um Faktor 3, ab, wenn ein elektrostatischer Abscheider verwendet wurde.

Weiterhin hatte der Einsatz von unterschiedlichen Brennstoffen in der gleichen Anlage ebenfalls einen Einfluss auf die Elementemissionen. Als Beispiele seien hier die verringerten Cadmium-Emissionen bei der Verbrennung von Fichten- gegenüber Buchenscheitholz im Kaminofen ohne EA (0,006 bzw. 0,003 mg/MJ) und die Blei-Emissionen im Hackschnitzelkessel mit Fichtenholzhackschnitzeln bzw. Winterweizenstrohpellets (0,002 bzw. 0,01 mg/MJ) aufgeführt. Auch der Einsatz des gleichen Brennstoffes, wie beispielsweise die Fichtenpelletverbrennung im Pelletofen und Pelletkessel ohne SWT führte zu unterschiedlichen

Rückständen auf den Filtern. So wurden z.B. beim Pelletofen 0,00007 mg/MJ Blei emittiert, beim Pelletkessel dagegen 0,005 mg/MJ, also die 7-fache Menge. Für die Cadmium-Freisetzung aus dem Pelletofen galt entsprechend 0,0001 mg/MJ, aus dem Pelletkessel hingegen 0,0005 mg/MJ.

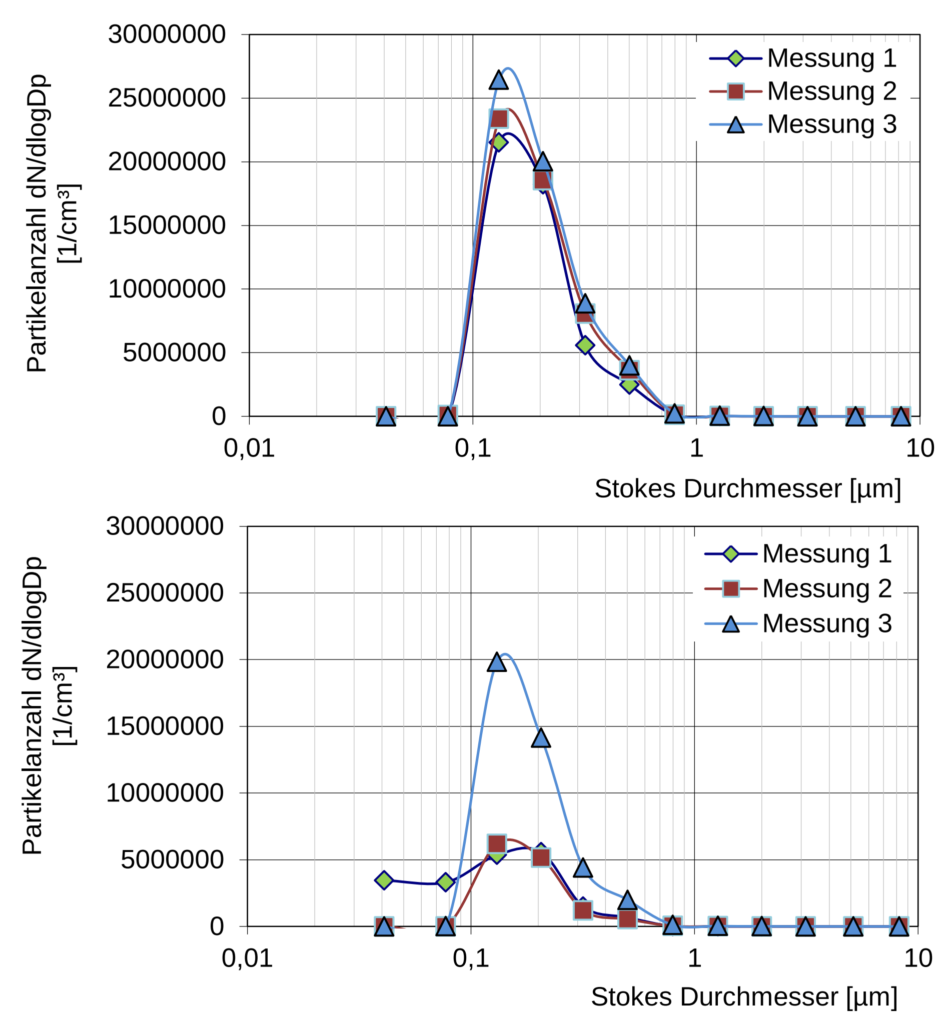


Abbildung 3-63: Partikelgrößenverteilung [Anzahl/cm³] bei der Verbrennung von Fichtenholzhackschnitzeln in der Feuerungsanlage Guntamatic Powerchip 20/30 ohne (oben) bzw. mit (unten) Einsatz eines elektrostatischen Abscheiders

Auch die Brennstoffform spielte eine zusätzliche Rolle. Beispielsweise führte die Verbrennung von Fichtenscheitholz zu höheren Massenströmen von Chrom (0,003 mg/MJ beim Kaminofen ohne EA, 0,008 mg/MJ beim Scheitholzkessel) als die Verbrennung von Fichtenpellets (0,0007 mg/MJ beim Pelletofen bzw. 0,002 mg/MJ beim Pelletkessel ohne SWT) oder von Fichtenholzhackschnitzeln (0,002

mg/MJ beim Hackschnitzelkessel ohne EA). Die Massenströme von Cadmium waren in der Nennlastphase bei der Verbrennung von Buchenscheitholz im Kaminofen bzw. im Scheitholzkessel (0,003 mg/MJ bzw. 0,0002 mg/MJ) geringer als bei der Verbrennung von Fichtenscheitholz (0,006 mg/MJ bzw. 0,0001 mg/MJ).

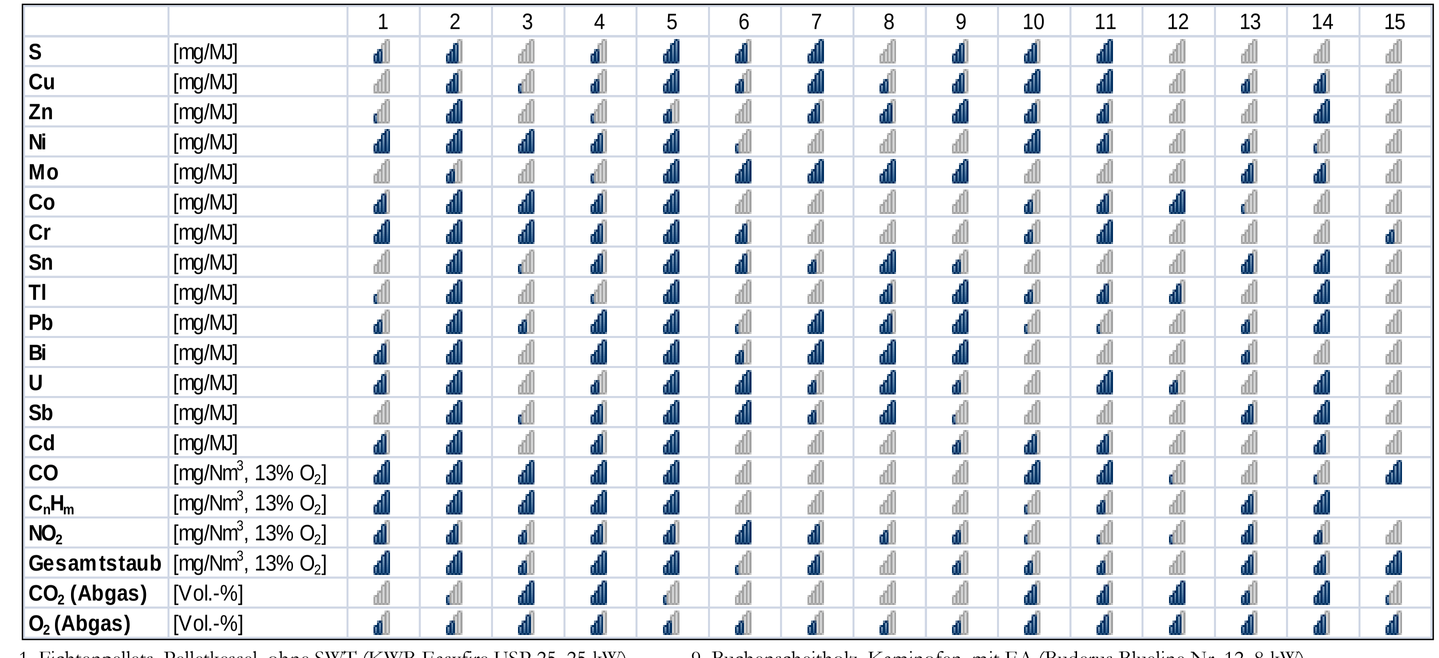
In Tabelle 3-30 ist zusammengestellt, wie viel Prozent der in den jeweiligen Brennstoffen enthaltenen Elementanteile in die Atmosphäre gelangen. Der in die Luft emittierte mittlere prozentuale Anteil steigt in der Reihenfolge Mangan (0,4), Thorium (0,6), Beryllium (1,0), Uran (1,2), Molybdän (2,2), Cobalt (2,5), Kupfer (3,8), Nickel (4,0), Schwefel (8,9), Chrom (9,5), Zinn (10), Antimon (13), Zink (20), Cadmium (24), Thallium (28), Blei (33) und Bismut (35 %) an.

Tabelle 3-30: Prozentuale Emissionen der in den Brennstoffen enthaltenen Elemente mit Mittelwert (x) und Standardabweichung (σ 1-sigma); die Zahlen in der oberen Zeile beziehen sich auf die Brennversuche, die unterhalb der Abbildung 3-64 näher beschrieben sind; Spalte 3 und 4 entsprechen den Angaben in Tabelle 3-29

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	x	σ
Be	n.b.	0,6	1,6	0,6	0,5	1,7	1,6	0,7	0,6	0,0	0,0	0,3	2,7	2,0	0,4	**1,0**	0,8
Bi	55,9	11,1	n.b.	n.b.	6,2	37,2	9,1	42,3	19,3	44,5	38,5	46,8	70,3	n.b.	n.b.	**34,6**	20,7
Cd	7,4	2,0	12,4	4,3	2,9	66,1	20,0	68,3	17,4	21,0	16,9	31,5	24,4	20,3	49,8	**24,3**	21,2
Co	1,3	0,9	0,3	0,3	0,5	1,9	2,1	n.b.	11,0	2,1	2,3	1,2	1,3	7,8	1,9	**2,5**	3,1
Cr	2,9	1,3	2,2	3,2	1,3	1,5	7,0	35,0	14,2	0,5	0,2	8,1	n.b.	54,4	1,2	**9,5**	15,9
Cu	8,7	3,0	5,4	2,8	1,5	8,7	1,4	3,9	1,4	0,9	0,9	3,2	3,7	3,7	7,2	**3,8**	2,6
Mn	0,3	0,2	0,4	0,1	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,2	1,0	1,2	0,3	0,4	0,5	**0,4**	0,3
Mo	10,3	2,8	5,7	2,7	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	1,7	1,5	1,9	0,5	3,0	1,1	**2,2**	2,7
Ni	1,3	0,7	1,3	2,6	1,2	5,6	6,0	n.b.	11,0	0,1	0,2	13,3	3,1	5,2	4,5	**4,0**	4,0
Pb	39,1	13,6	28,6	10,1	2,8	69,6	13,5	59,8	30,3	32,2	27,2	50,5	22,1	57,7	n.b.	**32,7**	20,3
S	13,7	10,1	25,9	7,4	3,2	5,5	3,1	8,6	3,2	0,7	0,7	3,1	17,0	21,1	9,9	**8,9**	7,6
Sb	20,2	4,8	34,0	9,1	3,8	2,4	12,6	5,2	20,3	7,4	7,2	5,9	20,0	30,4	15,1	**13,2**	9,8
Sn	n.b.	5,0	16,7	5,2	3,8	13,7	11,9	16,7	12,4	11,1	13,9	9,9	3,2	11,7	5,7	**10,0**	4,7
Th	0,0	0,0	0,4	0,2	0,0	3,3	1,3	0,3	0,1	0,0	0,1	0,2	1,7	0,3	0,2	**0,6**	0,9
Tl	16,0	4,6	30,9	11,9	4,2	19,5	11,3	64,8	10,4	29,4	25,2	n.b.	42,9	n.b.	89,3	**27,7**	25,0
U	0,3	0,1	1,2	0,7	0,1	3,7	2,1	0,2	1,6	0,1	0,1	0,5	5,9	0,6	0,4	**1,2**	1,7
Zn	29,3	8,4	26,0	10,6	13,7	26,4	4,7	15,0	5,8	14,4	13,0	49,7	20,8	22,1	37,5	**19,8**	12,4

n.b. = nicht bestimmt

Das heißt, dass im ungünstigsten Fall wie bei Blei und Bismut etwa 1/3 der im Brennstoff befindlichen Elemente in die Umwelt freigesetzt werden. Die Anteile schwanken stark von Anlage zu Anlage und von Brennversuch zu Brennversuch und sind nur als Anhaltspunkte zu bewerten (s. auch Standardabweichung σ in Tabelle 3-30 als Maß für die Schwankung).



1. Fichtenpellets, Pelletkessel, ohne SWT (KWB Easyfire USP 25, 25 kW)
2. Fichtenpellets, Pelletkessel, mit SWT (KWB Easyfire USP 25, 25 kW)
3. Fichtenholzhackschnitzel, Hackschnitzelkessel, ohne EA (GP, 30 kW)
4. Fichtenholzhackschnitzel, Hackschnitzelkessel, mit EA (GP, 30 kW)
5. Fichtenholzpellets, Pelletofen (Wodtke ivo.tec, 13 kW)
6. Fichtenscheitholz, Kaminofen, ohne EA (Buderus Blueline Nr. 12, 8 kW)
7. Fichtenscheitholz, Kaminofen, mit EA (Buderus Blueline Nr. 12, 8 kW)
8. Buchenscheitholz, Kaminofen, ohne EA (Buderus Blueline Nr. 12, 8 kW)
9. Buchenscheitholz, Kaminofen, mit EA (Buderus Blueline Nr. 12, 8 kW)
10. Winterweizenstrohpellets, Hackschnitzelkessel, mit EA, ohne SWT (GP, 30 kW)
11. Winterweizenstrohpellets, Hackschnitzelkessel, mit EA, mit SWT (GP, 30 kW)
12. Miscanthuspellets, Hackschnitzelkessel, mit EA (GP, 30 kW)
13. Fichtenscheitholz, Scheitholzkessel (HDG Navora, 30 kW)
14. Buchenscheitholz, Scheitholzkessel (HDG Navora, 30 kW)
15. Fichtenholzhackschnitzel, Großfeuerungsanlage (Müller TMV 15H, 650 kW)

EA = elektrostatischer Abscheider, SWT = Sekundärwärmetauscher, GP = Guntamatic Powerchip 20/30

Abbildung 3-64: Matrix zur relativen Bewertung der Verbrennungsgüte der untersuchten Kleinfeuerungsanlagen anhand energienormierter Emissionen ausgewählter umweltkritischer Elemente sowie CO, C_nH_m, NO_2, Gesamtstaub, CO_2 u. O_2

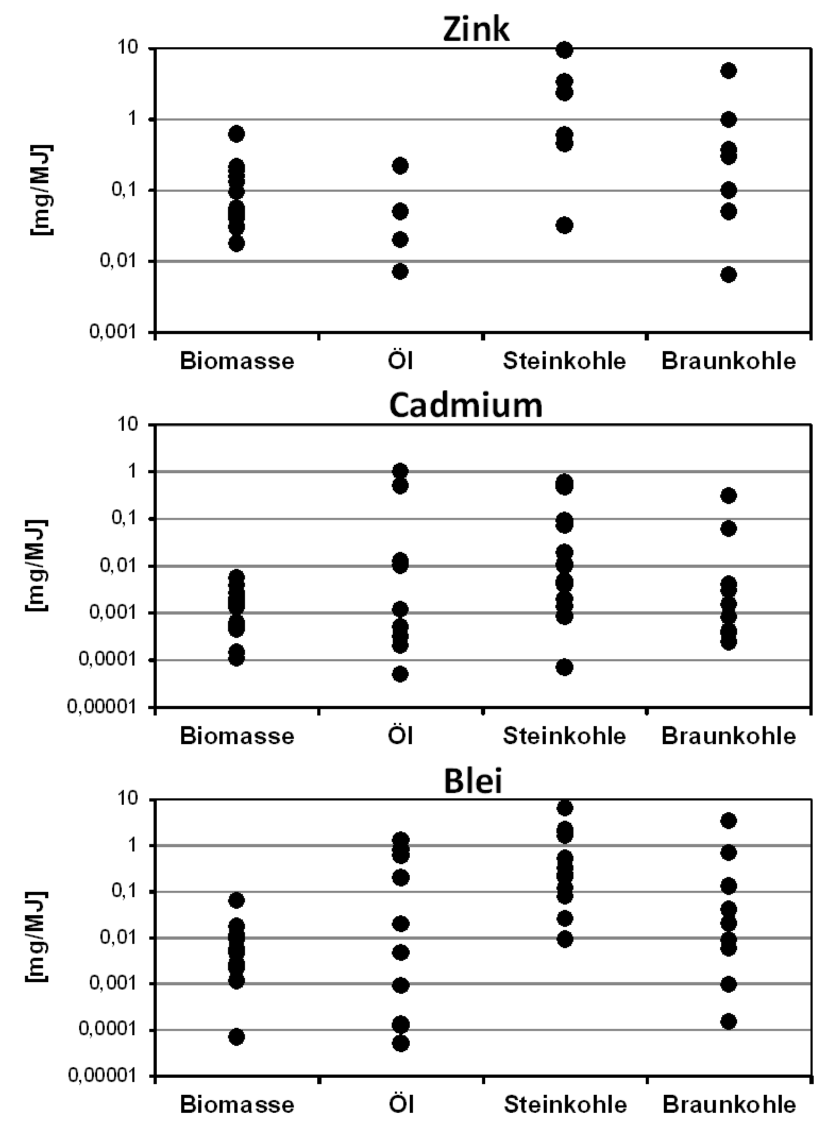


Abbildung 3-65: Energienormierte Emissionen [mg/MJ] der Elemente Zink, Cadmium und Blei in den untersuchten Biomassefeuerungsanlagen im Vergleich zu aus der Literatur stammenden Emissionsfaktoren für Öl, Stein- und Braunkohle (basierend auf Werten aus Seidel et al. 2013)

Die restlichen Mengen stecken in den Aschen (Tabelle 3-29), in der Feuerraumauskleidung bzw. den nicht beprobbaren Bereichen entlang des Abluftweges. Eine Ausnahme stellt vermutlich Schwefel dar, der teilweise gasförmig als SO_2 entweicht und nur zum Teil in den Aschen zurückgehalten wird.

Die einzelnen Ergebnisse machen deutlich, dass eine Bewertung der Anlagen schwierig ist, da die Emissionen der gesundheits- und umweltkritischen Elemente sich je nach Brennstoffart und -form, ihrem jeweiligen Freisetzungs-, Kondensations- und Abscheideverhalten und dem eingesetzten Anlagentyp mit und ohne Sekundärabscheidemaßnahmen teilweise sehr stark voneinander unterscheiden. Selbstverständlich muss eine Bewertung einer Verbrennungsanlage auch die energienormierten Emissionen von Stoffen beinhalten, die für die Güte der Verbrennung stehen, wie die Gehalte an CO, C_nH_m, Gesamtstaub, CO_2 und O_2 im Abgas.

Der Matrix in Abbildung 3-64 liegt eine 5-stufige graduelle Unterscheidung für die einzelnen Messparameter der einzelnen Brennversuche zugrunde: Je mehr blaue Balken bei einem Parameter vorhanden sind, desto positiver steht er im Kontext aller erfolgten Verbrennungsversuche, wohingegen weniger blaue Balken entsprechend negativer zu bewerten sind.

Als zusätzlicher Bewertungsansatz wurden die energienormierten Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse mit energienormierten Emissionen aus der Verbrennung der konventionellen Brennstoffe Öl und Kohle verglichen. Leider standen für die Emissionen durch letztere nur Daten für wenige Elemente zur Verfügung. Die aus der Verbrennung von Biomasse stammenden Emissionen waren ähnlich oder kleiner als die Emissionen von konventionellen Brennstoffen, wobei im Trend insbesondere Heizöl mit teilweise sehr geringen Elementkonzentrationen auch zu geringen Elementemissionen neigte (Abb. 3-65).

3.11.3.2 Emissionen von CO und organischen Schadstoffen

Niedrige CO-Emissionen liefern Hinweise auf die Vollständigkeit der Verbrennung. Die CO-Gehalte steigen häufig mit den Gehalten an organischem Kohlenstoff (OC) in der Abluft an, wobei in der Literatur allerdings selten die Inhaltsstoffe der organischen Fraktionen aufgeführt werden. Unsere Untersuchungen zeigten, dass sich während der unvollständigen Verbrennung insbesondere bei Kaminöfen neben erhöhten organischen Emissionen auch erhöhte Emissionen von PAK mit einem hohen Anteil von oxygenierten Verbindungen (oxy-PAK) bilden.

Des Weiteren war der Anteil von Verbindungen höher, die direkt aus dem Abbau der Lignin- und Zellulose-Struktur resultierten. Auch diese Verbindungen wiesen einen hohen Anteil von Carbonyl- und Carboxyl-Gruppen auf, die aufgrund ihrer Reaktivität gesundheitlich relevant sein können, bislang aber nicht eingehend toxikologisch untersucht wurden - im Gegensatz zum Wirkmechanismus von PAK.

In den Abbildungen 3-66 und 3-67 sind die energienormierten PAK-Emissionen als emittierte Menge [µg/MJ] und umgerechnet als Toxizitätsäquivalente [TEQ/MJ] der verschiedenen Brennversuche unter Volllastbedingungen und auch bei Fehlbedienung graphisch zusammengefasst. Unter ungünstigen Betriebsbedingungen wurden TEQ-Werte der Emissionen des Kaminofens (495 µg/MJ) ermittelt, die mehr als 80.000-fach über den Werten des automatisch beschickten,

modernen Pelletkessels in Kombination mit einem Sekundärwärmetauscher lagen (Abb. 3-67). Im Vergleich zu typischen Ölbrennern (TEQ-Wert 0,001 µg/MJ) wurde ein guter TEQ-Wert von 0,006 µg/MJ erreicht, der somit nur noch um das 6-fache über dem des Ölbrenners lag.

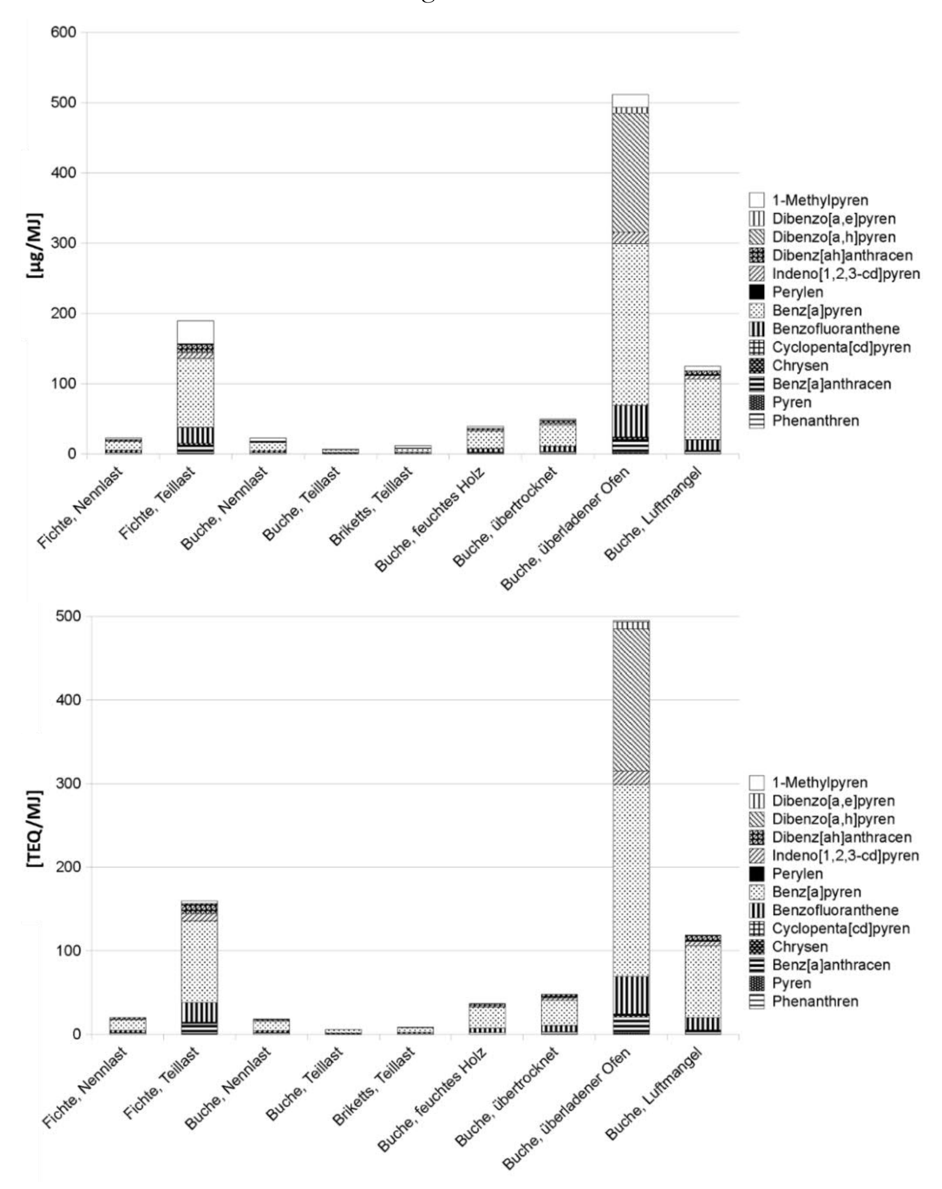


Abbildung 3-66: Energienormierte PAK-Werte als emittierte Menge [µg/MJ] (oben) und als Toxizitätsäquivalente [TEQ/MJ] (unten) unter Volllastbedingungen bzw. bei Fehlbedienung

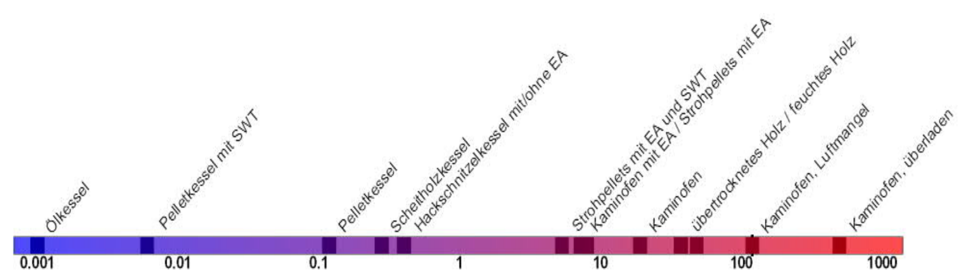


Abbildung 3-67: Logarithmisch skalierte, energienormierte PAK-TEQ-Werte [TEQ/MJ] unter Volllastbedingungen bzw. bei Fehlbedienungen (Daten aus Abb. 3-66) im Vergleich zu einem TEQ-Wert für Ölbrenner aus der Literatur

Insbesondere der Einsatz eines Sekundärwärmetauschers hatte wesentlichen Anteil an der Reduktion der PAK-Konzentrationen und damit deutlichen Einfluss auf die TEQ-Werte. Während die Partikelemissionen nur um etwa 20 % reduziert wurden, verringerten sich die TEQ-Werte um mehr als 95 %. Dies war auf die Kondensation heißer organischer Bestandteile im Sekundärwärmetauscher zurückzuführen. Dadurch wurde eine spätere Kondensation der organischen Fraktionen auf den Partikeln im Aerosol verhindert bzw. die Partikelneubildung unterbunden.

Ein elektrostatischer Abscheider hatte vorwiegend Einfluss auf die Partikelgesamtmasse, welche um etwa 60 % sank. In gleichem Maße verringerten sich auch die TEQ-Werte. Die von Nussbaumer & Lauber (2010) beschriebene Selektivität der Abscheidung für bestimmte Partikelfraktionen (anorganische Fraktionen > Ruß > organische Fraktionen) konnte nicht festgestellt werden, was auf eine relativ einheitliche Partikelmorphologie nach dem Verdünnungstunnel zurückgeführt werden kann.

Bei Teillastbedingungen (also reduzierter Luftzufuhr) zeigten sich insbesondere bei Fichtenholz gegenüber Volllastbedingungen deutlich erhöhte Emissionen organischer Verbindungen, woraus ein signifikant gesteigerter TEQ-Wert resultierte: 160 µg/MJ unter Teillast gegenüber 20 µg/MJ unter Volllast (Seidel et al. 2013; Elsasser et al. 2013). Der TEQ-Wert, der aus den PAK-Emissionen der Buchenholz-Verbrennung ermittelt wurde, verringerte sich im Teillastbereich sogar etwas, von 8 µg/MJ unter Teillast gegenüber 18 µg/MJ unter Volllast. Dieser Unterschied stellte sich aber als statistisch nicht signifikant heraus, bedingt durch die hohe Variation der Emissionen beim Kaminofen und der aufwandsbedingten geringen Anzahl an Wiederholungsversuchen. Bei Experimenten mit 3,3-facher Überladung des Brennraumes mit Buchenholzscheiten (ohne Rinde) machten PAKs einen Anteil von bis zu 15 % des organischen Aerosolanteils aus, während bei normaler Beschickung „nur" 4 % PAKs entstehen (Bruns et al. 2015).

3.11.4 Diskussion

Die Bewertung der einzelnen Anlagen anhand von Elementmassenströmen erwies sich als äußerst schwierig, da diese sehr variabel und von den eingesetzten Brennstoffen und anlagenspezifischen Abbrandbedingungen abhängig sind. Die Ergebnisse machten deutlich, dass es eine enorme Herausforderung darstellt, plausible Elementbilanzen zu erhalten.

Die Wiederfindungen waren insbesondere bei den umweltbedeutsamen Elementen Schwefel, Chrom, Cobalt, Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium, Zinn, Antimon, Thallium, Blei, Bismut und Uran, die im Fokus standen, in der Regel erheblich geringer als 100 %, wie die Elementbilanzierungen über Input-Output-Berechnungen zeigten. Auch die Bilanzierung an zwei in der Praxis installierten Zentralfeuerungsanlagen ergab zu geringe Wiederfindungen der meisten umweltbedeutsamen Elemente. Die aus den Anlagen entnommenen Aschen sowie die meisten eingesetzten Brennstoffe waren relativ homogen, so dass die Abweichungen von 100 % hiermit nicht erklärt werden konnten. Jedoch können die Elementkonzentrationen im Scheitholz aufgrund des variablen Rindenanteils erheblich schwanken.

Bei anderen Elementen dagegen wie Aluminium, Titan, Seltene Erden und Zirconium waren die Wiederfindungen teilweise erheblich größer als 100 %. Ursache für diese Überbefunde sind vermutlich Korrosions- und Abriebvorgänge an der meist aus Schamotte bestehenden Feuerraumauskleidung, wodurch es zu einer Kontamination der Brennraumasche kommen kann (LfU 2009). Berechnungen zeigten, dass dies durchaus eine plausible Erklärung der Überbefunde einiger Elemente sein kann. Andererseits wird bei den Elementen mit Minderbefunden eine Reaktion der Elemente mit dem Auskleidungsmaterial vermutet, welches z.B. bei einem Kaminofen erhebliche aus dem Brennstoff freigesetzte Elementmengen aufnehmen könnte.

In Hinblick auf die Bedeutsamkeit der Elemente für die Umwelt konnte sichergestellt werden, dass die bei der Bilanzierung fehlenden Elemente nicht in die Atmosphäre entweichen. Unklar ist, wie groß das Senkenpotenzial im Ofen ist und ob sich im Laufe der Zeit (vermutlich mehrere Jahre) eine Art Gleichgewicht einstellt, wo Abgabe und Aufnahme eines Elementes ausgeglichen sind. Letztendlich bleibt die Frage nach Senken innerhalb der Verbrennungsstätten offen. Zukünftig müssten hier systematische Untersuchungen verschiedener Feuerraumauskleidungen durchgeführt werden, da sich die Feuerraumauskleidung vermutlich als Senke für Schadelemente eignet und aktiv als Abscheider genutzt werden könnte. Auch weiterführende Untersuchungen der Ablagerungen im Abgasweg, sowohl am Prüfstand als auch in der Praxis, sind anzuraten.

Die Darstellung der anlagenspezifischen Emissionen der umweltrelevanten Elemente Schwefel, Chrom, Cobalt, Nickel, Kupfer, Zink, Molybdän, Cadmium, Zinn, Antimon, Thallium, Bismut, Blei und Uran (in mg/MJ, ermittelt über den Rückstand auf den Filtern, ermöglichte den Vergleich der verschiedenen Anlagen, Betriebsvariationen und Brennstoffarten. Güteparameter der Verbrennung, wie die

Emissionen an CO, C_nH_m, CO_2, O_2 und Gesamtstaub sowie die energienormierten Emissionen umweltbedeutsamer Elemente zur Bewertung der verschiedenen Anlagen zeigten, dass der Pelletofen, der Pelletkessel mit SWT, der Hackschnitzelkessel (Fichtenholzhackschnitzel) mit EA und auch der Scheitholzkessel (Buchenscheitholz) die für diese Parameter günstigsten Anlagen waren (Abbildung 3-68).

Der Scheitholzkessel (Fichtenscheitholz), der Hackschnitzelkessel (Miscanthuspellets) sowie auch die Großfeuerungsanlage waren verhältnismäßig ungünstige Anlagen. Suboptimale Einstellungen des Hackschnitzelkessels für den Brennstoff Miscanthus führten zu den höchsten Emissionen aller Anlagen. Auch beim Kaminofen waren die Gesamtstaubemissionen sehr hoch, konnten aber durch den Einsatz eines elektrostatischen Abscheiders deutlich reduziert werden. Ein Sekundärwärmetauscher führte ebenfalls zu einer Reduzierung der Emissionen, so dass auch dessen Einsatz als sinnvoll erachtet wird.

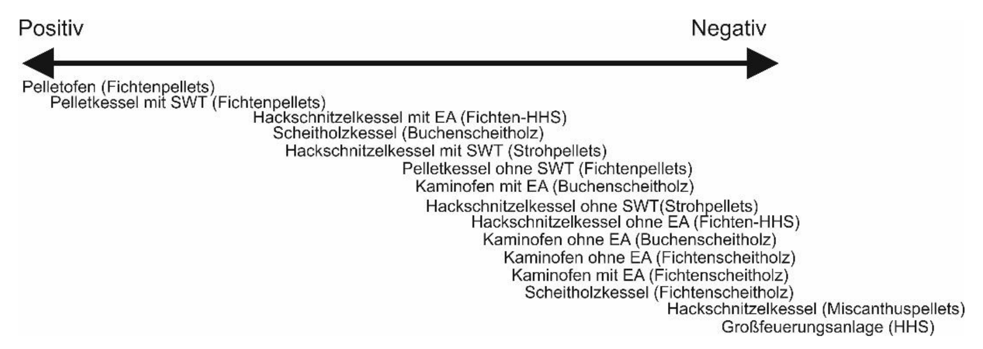


Abbildung 3-68: Relative Bewertung des Emissionsverhaltens der untersuchten Anlagen anhand der in Abbildung 3-64 vorgestellten Matrix

Auch die Brennstoffart und -form kann, wie z.B. beim Kaminofen, einen erkennbaren Einfluss auf die Emissionen haben. Fichtenscheitholz erzeugte geringere Emissionen als das in der gleichen Anlage eingesetzte Buchenscheitholz. Beim Scheitholzkessel wies Buchenscheitholz geringere Emissionen als Fichtenholz auf.

Bei den Flugaschen muss grundsätzlich zwischen Stäuben aus einer unvollständigen und einer vollständigen Verbrennung unterschieden werden. Die entstehenden Flugaschen setzen sich aus organischem Material und Elementverbindungen zusammen. Die Summe aus beiden stellt den Gesamtstaub dar. Die Verhältnisse der organischen zu den anorganischen Bestandteilen sind generell abhängig von den unterschiedlichen Bedingungen bei der Verbrennung, wie dem Sauerstoffangebot, der Glutbetttemperatur, der Verweilzeit in der Brennkammer und der Durchmischung der Verbrennungsgase mit Sauerstoff.

Bei unvollkommener Verbrennung haben die organischen Emissionen ein vermutlich größeres toxisches Potenzial als die Schadelemente. Im Extremfall werden bei unzureichender Verbrennung hoch krebserregende Dibenzopyrene im Aerosol nachgewiesen. Erfolgt eine vollständige Verbrennung, bestimmen alleine die anorganischen Elemente das toxikologische Potenzial. Es kann bisher nicht mit

Bestimmtheit gesagt werden, ob eine vollständige Verbrennung ein geringeres toxisches Potenzial aufweist als eine unvollständige Verbrennung. Da jedoch die Summe der Massenströme der anorganischen Elemente nicht größer sein kann als der Gesamtstaubmassenstrom, führt eine Reduzierung der Gesamtstaubemission grundsätzlich zu einer Reduzierung des toxischen Potenzials kritischer Stoffe.

Weil keine geeigneten einheitlichen Bewertungsschemata der Toxizität von Feinstäuben zur Verfügung stehen, ist ein Vergleich der energienormierten Elementemissionen beim Verbrennen von biogenen Feststoffen mit denen von Kohle bzw. Erdöl sinnvoll. Auch die Ermittlung der PAK-TEQ-Werte liefert gegenüber direkten Toxizitätstests einen kostengünstigen und schnellen Vergleich von regenerativen mit fossilen Verbrennungsquellen. Die Ermittlung der sogenannten 16 US-EPA-PAK (US-EPA 1984) stellt ein Standardanalyseverfahren dar, das in vielen Routinelabors eingesetzt wird und noch um einige wenige, toxisch relevante PAK erweitert werden müsste.

Letztendlich können weder die Emissionsfaktoren der Elemente noch die TEQ-Werte die Toxizität des emittierten Feinstaubs real wiedergeben, da verschiedene Einflussgrößen unberücksichtigt bleiben. Die Toxizität der Partikel ist neben der Partikelzusammensetzung stark von der Partikelgröße und der Morphologie sowie der biologischen Verfügbarkeit der einzelnen Bestandteile abhängig. Zusätzlich können beispielsweise anorganische Partikel durch aufkondensierte, organische Bestandteile überdeckt sein, welche die toxische Wirkung der Partikel beeinflussen. Auch Wechselwirkungen der Schadstoffe untereinander (eventuelle Verminderung oder Verstärkung einer Einwirkung) sind nicht bekannt. Aktuell laufende Studien untersuchen mittlerweile die gesundheitlichen Auswirkungen der Gesamtpartikel von Verbrennungsaerosolen mittels direkter Exposition lebender Lungenzellen in speziellen Expositionsvorrichtungen (Air-Liquid-Interface) unter lungenähnlichen Bedingungen. Auf diese Weise können Wechselwirkungen von Schadstoffen, aber auch mögliche positive Einflüsse von Antioxidantien im Aerosol erfasst werden (Mülhopt et al. 2016).

Die Emissionsfaktoren bei der Verbrennung von Kohle und Öl stammten aus verschiedenen, teilweise alten Quellen. Sie variierten, wie auch die ermittelten Emissionsfaktoren, vergleichsweise stark, so dass eine genauere Betrachtung unter den jeweiligen Bedingungen, insbesondere auch unter Beachtung der Anlagentypen und der Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe, erfolgen müsste, was in Abbildung 3-65 nicht berücksichtigt werden konnte. Die energienormierten Massenströme von Cadmium, Blei, Kupfer, Chrom, Nickel und Zink bei Kohle und Öl machen im Vergleich zu denen von Holz und Stroh deutlich, dass biogene Festbrennstoffe gewöhnlich vergleichbare oder geringere Emissionen aufweisen.

Dem Vorteil von Holz und Stroh als nachhaltige Energielieferanten zur Nutzung in Groß- und Kleinfeuerungsanlagen stehen die vermeintlich vergleichsweise hohen Emissionen an Luftschadstoffen, insbesondere Feinstaub, gegenüber (Nussbaumer & Klippel 2006). Nach Struschka et al. (2008) war der Bestand an installierten Feuerstätten im Geltungsbereich der Ersten Verordnung zur Durchführung

des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) im Jahr 2005 mit ~14 Mio. Anlagen für Festbrennstoffe (Kohle- und Holzbrennstoffe) doppelt so hoch wie der Bestand an Feuerungsanlagen für Heizöl (extra leicht). Die Anzahl der Feuerungsanlagen für Brenngase lag in einem ähnlichen Bereich wie die Anlagenzahl für Festbrennstoffe. Diese Anlagen emittierten aber, mit Ausnahme von Quecksilber, nahezu keine Elemente, so dass deren toxisches Potenzial als sehr gering einzuschätzen ist.

Weitere detailliertere Ergebnisse aus dem Teilprojekt sind zu finden bei Orasche (2013), Orasche et al. (2012, 2013), Elsasser et al. (2013) sowie bei Seidel (2013) und Seidel et al. (2013).

3.11.5 Schlussfolgerungen für die Praxis

In Hinblick auf steigende Preise für fossile Brennstoffe und aus politischen Gründen wird es voraussichtlich zu einem weiteren Anstieg von Feuerungsanlagen für holzartige bzw. nicht-holzartige Festbrennstoffe kommen. Demnach ist zukünftig eine Reduzierung der Staubemissionen durch Sekundärmaßnahmen und eine weitere Optimierung der Anlagen- und Verbrennungstechniken mit der damit verbundenen Reduzierung von Elementemissionen dringend notwendig. Für den Gesetzgeber müssen auch für Kleinfeuerungsanlagen Grundlagen für die einzuhaltende Güte der Brennstoffe (Feuchtigkeit, Schmutzbelastung, usw.) und verbesserte und erweiterte Emissionsgrenzwerte erarbeitet werden. Das heißt, es wäre zukünftig anzuraten, neben Grenzwerten für Gesamtstaub und Kohlenstoffmonoxid ebenfalls Grenzwerte für ausgewählte umweltkritische Elemente festzulegen.

In der Praxis ist es daher angeraten, nur Feuerungsanlagen mit modernster Technik einzusetzen, um die seit 1. Januar 2015 geltenden verschärften Grenzwerte für Gesamtstaub- und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen für Kleinfeuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV einzuhalten bzw. um generell sicherzustellen, dass die Anlagen die möglichst geringsten Emissionen aufweisen. Eine entsprechende Richtlinie des VDI (2016) für nachgeschaltete Staubminderungseinrichtungen für Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe gibt es bereits. Ferner hat das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) zusammen mit einer Holzheizungsfirma (Team Wittus) einen emissionsarmen Holzpelletofen (Modell Pellwood; 13 kW) entwickelt, wobei die Testkriterien Sauberkeit, Effizienz, Sicherheit sowie Innovation und Marktpotenzial im Vordergrund standen (DBFZ 2016; Hartmann 2017). Dieser Ofen gewann den 1. Preis der Allianz for Green Heat (USA) aufgrund seines kompletten Ausbrandverhaltens (keine Rußbildung) und kleinsten CO- und Feinstaubwerten. Auch im Betrieb mit Scheitholz ist dieser Ofen extrem emissionsarm.

Bei bisherigen Feuerstätten sollten die Betreiber darauf achten, dass die Anlage unter den in der Anleitung beschriebenen, möglichst optimalen Bedingungen betrieben wird und mit dem Brennstoff betrieben wird, der für die Anlage zugelassen ist.

Literatur

Andersson, O. & Marklund, S. (1998). Emissions of organic compounds from biofuel combustion and influence of different control parameters using a laboratoy scale incinerator. *Chemosphere* 36, 1429-1443.

Boman, C., Forsberg, A.B. & Järvholm, B.G. (2003). Adverse health effects from ambient air pollution in relation to residential wood combustion in modern society. *Scandinavian Journal of Work, Environment* & *Health* 29(4), 251-260.

Boman, C., Pettersson, E., Westerholm, R., Boström, D. & Nordin, A. (2011). Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 1: Pellet Stoves. *Energy & Fuels* 25(1), 307-314.

Bruns, E.A., Krapf, M., Orasche, J., Huang, Y., Zimmermann, R., Drinovec, L., Močnik, G., El-Haddad, I., Slowik, J.G., Dommen, J., Baltensperger, U. & Prévôt, A.S.H. (2015). Characterization of primary and secondary wood combustion products generated under different burner loads. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 2825-2841.

Christensen, K.A., Stenholm, M. & Livbjerg, H. (1998). The formation of submicron aerosolparticles, HCl and SO_2 in straw-fired boilers. *Journal of Aerosol Science* 29, 421-444.

DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum) (2016). *DBFZ ("Team Wittus") gewinnt US-Feuerungswettbewerb mit dem ersten emissionsfreien Kaminofen der Welt*. Pressemitteilung. Gesichtet am 30.4.2017: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Presseinformationen/2016/PM_Wettbewerb_Brookhaven.pdf

DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) (2013). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) [MAK Value Documentation, 2012]. In: *The MAK-Collection for Occupational Health and Safety.* 1-216, Wiley-VCH, Weinheim. Dockery, D.W. (2001). Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of parti-culate air pollution. *Environmental Health Perspectives*, 109 (4), 483-496.

Dockery, D.W. & Stone, P.H. (2007). Cardiovascular Risks from Fine Particulate Air Pollution. *New England Journal of Medicine* 356(5), 511-513.

Dockery, D.W., Speizer, F.E., Stram, D.O., Ware, J.H., Spengler, J.D. & Ferris, B.G. (1989). Effects of inhalable particles on respiratory health of children. *American Review of Respiratory Disease* 139(3), 587-594.

Dockery, D.W., Ware, J.H., Ferris, B.G., Speizer, F.E., Cook, N.R. & Herman, S.M. (1982). Change in pulmonary function in children associated with air pollution episodes. *Journal of the Air Pollution Control Association* 32(9), 937-942.

Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M., Ferris, B.G. & Speizer, F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England Journal of Medicine* 329, 1753-1759.

Dockery, D.W., Cunningham, J., Damokosh, A.I., Neas, L.M., Spengler, J.D., Koutrakis, P., Ware, J.H., Raizenne, M. & Speizer, F.E. (1996). Health effects of acid aerosols on North American children: respiratory symptoms. *Environmental Health Perspectives* 104(5), 500-505.

Ellner-Schuberth, F., Hartmann, H., Turowski, P. & Roßmann, P. (2010). Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen. *Berichte aus dem TFZ* 22, 139 S., Straubing.

Elsasser, M., Busch, C., Orasche, J., Schön, C., Hartmann, H., Schnelle-Kreis, J., & Zimmermann, R. (2013). Dynamic Changes of the Aerosol Composition and Concentration during Different Burning Phases of Wood Combustion. *Energy & Fuels* 27, 4959-4968.

Ferge, T., Maguhn, J., Hafner, K., Mühlberger, F., Davidovic, M., Warnecke, R. & Zimmermann, R. (2005). On-Line Analysis of Gas-Phase Composition in the Combustion Chamber and Particle Emission Characteristics during Combustion of Wood and Waste in a Small Batch Reactor. *Environmental Science & Technology* 39(6), 1393-1402.

Hartmann, I. (2017). *Katalytische Emissionsminderung*. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum. Gesichtet am 30.4.2017: https://www.dbfz.de/schwerpunkte/katalytische-emissionsminderung.html

Kasurinen, S., Jalava, P.I., Happo, M.S., Sippula, O., Uski, O., Koponen, H., Orasche, J., Zimmermann, R., Jokiniemi, J. & Hirvonen, M.-R. (2017). Particulate emissions from the combustion of birch, beech, and spruce logs cause different cytotoxic responses in A549 cells. *Environmental Toxicology* 32, 1487-1499.

Katsouyanni, K. (2003). Ambient air pollution and health. *British Medical Bulletin* 68(1), 143-156.

Kennedy, I.M. (2007). The health effects of combustion-generated aerosols. *Proceedings of the Combustion Institute* 31(2), 2757-2770.

Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F.E. & Dockery, D.W. (2006). Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard Six Cities Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 173,667-672.

Lahl, U. (2005). *Feinstaub - eine gesundheitspolitische Herausforderung*. Vortrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zum 46. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie, 17.03.2005, Berlin.

Lenz, V. (2010). *Feinstaubminderung im Betrieb von Scheitholzkaminöfen unter Berücksichtigung der toxikologischen Relevanz*. Dissertation, 142 S., Technische Universität Hamburg-Harburg.

Lenz, V. (2012). *Emissionsminderungsmaßnahmen bei Halmgutfeuerungsanlagen*. 2. Internationale Fachtagung Strohenergie, 29./30.03.2012, Berlin.

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2009). *Verwertung und Beseitigung von Holzaschen*. Merkblatt, 19 S., Augsburg.

Lighty, J.S., Veranth, J. & Sarofim, A. (2000). Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health. *Journal of the Air & Waste Management Association* 50, 1565-1618.

Mantau, U. & Sörgel, C. (2006). *Energieholzverwendung in privaten Haushalten. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente*. Zwischenbericht vom 06.07.2006, 18 S., Hamburg.

Merten, D., Falkenberg, D., Nill, M. & Kaltschmitt, M. (2004). *Wärmegewinnung aus Biomasse - Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)*. Anlagenband zum Abschlussbericht, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig.

Miller, C.A., Ryan, J.V. & Lombardo, T. (1996). Characterization of air toxic from an oil-fired firetube boiler. *Journal of the Air & Waste Management Association* 46(8), 742-748.

Mülhopt, S., Dilger, M., Diabaté, S., Schlager, C., Krebs, T., Zimmermann, R., Buters, J., Oeder, S., Wäscher, T., Weiss, C. & Paur, H.-R. (2016). Toxicity testing of combustion aerosols at the air-liquid interface with a self-contained and easy-to-use exposure system. *Journal of Aerosol Science* 96, 38-55.

Naeher, L.P., Brauer, M., Lipsett, M., Zelikoff, J.T., Simpson, C.D., Koenig, J.Q. & Smith, K.R. (2007). Woodsmoke Health Effects: A Review. *Inhalation Toxicology* 19(1), 67-106.

Nussbaumer, T. & Klippel, N. (2006). Schadstoffarme Verbrennung. *tec21* 48, 5-9.

Nussbaumer, T. & Lauber, A. (2010). *Formation mechanisms and physical properties of particles from wood combustion for design and operation of electrostatic precipitators*. 18th European Biomass Conference and Exhibition, 03.-07.05.2010, Lyon.

Oberdörster, G. (1996). Effects of Ultrafine Particles in the Lung and Potential Relevance to Environmental Particles. In J.C.M. Marijnissen & L. Gradoń (Hrsg.). *Aerosol Inhalation: Recent Research Frontiers*. S. 165-173, Springer-Verlag

Orasche, J. (2013). *Emissions from wood combustion - Formation of particle bound organic wood smoke compounds, the potential for formation of secondary organic aerosol and tracing in the atmosphere*. Dissertation, 176 S., Universität Rostock.

Orasche, J., Schnelle-Kreis, J., Abbaszade, G. & Zimmermann, R. (2011). Technical Note: In-situ derivatization thermal desorption GC-TOFMS for direct analysis of particle-bound non-polar and polar organic species. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 8977-8993.

Orasche, J., Seidel, T., Hartmann, H., Schnelle-Kreis, J., Chow, J.C., Ruppert, H. & Zimmermann, R. (2012). Comparison of emissions from wood combustion. Part 1: Emission factors and characteristics from different small-scale residential heating appliances considering particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-related toxicological potential of particle-bound organic species. *Energy & Fuels* 26(11), 6695-6704.

Orasche, J., Schnelle-Kreis, J., Schön, C., Hartmann, H., Ruppert, H., Arteaga-Salas, J.M. & Zimmermann, R. (2013). Comparison of emissions from wood combustion. Part 2: Impact of combustion conditions on emission factors and characteristics of particle-bound organic species and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-related toxicological potential. *Energy* & *Fuels* 27(3), 1482-1491.

Orozco-Levi, M. (2006). Wood smoke exposure and risk of chronic obstructive pulmonary disease. *European Respiratory Journal* 27(3), 542-546.

Oser, M. (2003). *Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Beeinflussung der Partikelemissionen durch Primärmaßnahmen und Konzept für eine partikelarme automatische Holzfeuerung (Low-Particle-Feuerung).* Schlussbericht, 97 S., Bern.

Pettersson, E., Boman, C., Westerholm, R., Boström, D. & Nordin, A. (2011). Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 2: Wood Stove. *Energy & Fuels* 25(1), 315-323.

Pio, C.A., Legrand, M., Oliveira, T., Afonso, J., Santos, C., Caseiro, A., Fialho, P., Barata, F., Puxbaum, H., Sanchez-Ochoa, A., Kasper-Giebl, A., Gelencsér, A., Preunkert, S. & Schock, M. (2007). Climatology of aerosol composition (organic versus inorganic) at nonurban sites on a west-east transect across Europe. *Journal of Geophysical Research* 112, D23S02, 15 S.

Pope, C.A. & Dockery, D.W. (1992). Acute health effects of PM_{10} pollution on symptomatic and asymptomatic children. *American Review of Respiratory Disease* 145(5), 1123-1128.

Pope, C.A., Ezzati, M. & Dockery, D.W. (2009). Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *New England Journ. of Medicine* 360, 376-386.

Pope, C.A., Dockery, D.W., Spengler, J.D. & Raizenne, M.E. (1991). Respiratory health and PM_{10} pollution. A daily time series analysis. *American Review of Respiratory Disease* 144(3, Pt.1), 668-674.

Pope, C.A., Thun, M.J., Namboodiri, M.M., Dockery, D.W., Evans, J.S., Speizer, F.E. & Heath, C.W. (1995). Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 151(3, Pt.1), 669-674.

Pope, C.A., Muhlestein, J.B., May, H.T., Renlund, D.G., Anderson, J.L. & Horne, B.D. (2006). Ischemic heart disease events triggered by short-term exposure to fine particulate air pollution. *Circulation* 114(23), 2443-2448.

Rogge, W.F., Hildemann, L.M., Mazurek, M.A., Cass, G.R. & Simoneit, B.R.T. (1997). Sources of fine organic aerosol. 8. Boilers burning No. 2 distillate fuel oil. *Environmental Science* & *Technology* 31(10), 2731-2737.

Seidel, T. (2013). *Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Stroh, Holz und Biogas.* Dissertation, 366 S., Georg-August-Universität Göttingen.

Seidel, T., Orasche, J., Ruppert, H., Schnelle-Kreis, J. & Hartmann, H. (2013). Emissions of organic and inorganic pollutants during the combustion of wood,

straw and biogas. In H. Ruppert, M. Kappas & J. Ibendorf (Hrsg.): *Sustainable Bioenergy Production - An Integrated Approach.* S. 387-422, Springer, Berlin u.a.

Simpson, D., Yttri, K.E., Klimont, Z., Kupiainen, K., Caseiro, A., Gelencsér, A., Pio, C., Puxbaum, H. & Legrand, M. (2007). Modeling carbonaceous aerosol over Europe: Analysis of the CARBOSOL and EMEP EC/OC campaigns. *Journal of Geophysical Research* 112, D23S14, 26 S.

Sippula, O. (2010). *Fine Particle Formation and Emissions in Biomass Combustion*. Dissertation, 68 S., University of Eastern Finland, Kuopio.

Sippula, O., Hokkinen, J., Puustinen, H., Yli-Pirilä, P. & Jokiniemi, J. (2007). Fine Particle Emissions from Biomass and Heavy Fuel Oil Combustion without Effective Filtration (BIOPOR). *VTT Working Papers* 72, 45 S.

Struschka, M., Zuberbühler, U., Dreiseidler, A., Dreizler, D. & Baumbach, G. (2003). *Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung.* UFOPLAN Forschungsbericht 299 44 140, UBA-FB 000477, Universität Stuttgart/Umweltbundesamt.

Struschka, M., Kilgus, D., Springmann, M. & Baumbach, G. (2008). *Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung.* UFOPLAN Forschungsbericht 205 42 322, UBA-FB 001217, Universität Stuttgart/Umweltbundesamt.

Tissari, J., Sippula, O., Kouki, J., Vuorio, K. & Jokiniemi, J. (2008). Fine Particle and Gas Emissions from the Combustion of Agricultural Fuels Fired in a 20 kW Burner. *Energy* & *Fuels* 22(3), 2033-2042.

Tsyro, S., Simpson, D., Tarrasón, L., Klimont, Z., Kupiainen, K., Pio, C. & Yttri, K.E. (2007). Modeling of elemental carbon over Europe. *Journal of Geophysical Research* 112, D23S19, 17 S.

UBA (Umweltbundesamt 2017). Feinstaubemissionen (PM_{10}) aus Kleinfeuerungsanlagen. *Zentrales System Emissionen (Stand Mai 2017).* Gesichtet am 2.6.2017: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/2_abb_pm10-emi-kfa_2017-06-01.png

US-EPA (US Environmental Protection Agency) (1984). *Health effects assessment for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH).* U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/540/1-86-013.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2016). VDI 3670 - *Abgasreinigung – Nachgeschaltete Staubminderungseinrichtungen für Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe.* VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 6: Abgasreinigung - Staubtechnik. 27 S.

Woodruff, T.J., Axelrad, D.A., Kyle, A.D., Nweke, O., Miller, G.G. & Hurley, B.J. (2004). Trends in environmentally related childhood illnesses. Pediatrics 113(4 Suppl.), 1133-1140.

3.12 Koordination und Wissensmanagement des transdisziplinären Forschungsprojektes „Bioenergie im Spannungsfeld“

Jens Ibendorf, Claus Kannwischer, Wiebke Girschner, Swantje Eigner-Thiel

3.12.1 Aufgaben der Koordination

Innerhalb des Projektes wurde eine Koordinatorenstelle eingerichtet, um die vielfältigen Bereiche zu homogenisieren, zusammenzuführen und einen wissenschaftlichen Mehrwert für die Einzeldisziplinen herauszuarbeiten. Somit stellte der Koordinator die Schnittstelle zwischen den diversen Teilprojekten dar.

Der Rahmen des Gesamtprojektes war so angelegt, dass die verschiedenen Teilprojekte einerseits innerhalb ihrer Fachdisziplinen die unterschiedlichen Forschungsaufgaben bearbeiteten. Andererseits war es erklärtes Ziel des Projektes, die Grenzen der Einzeldisziplinen zu überwinden und die Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachbereiche zu verbessern. Entsprechend des Zieles des Gesamtprojektes, die Spannungsfelder, in denen sich die Bioenergie bewegt, zu verringern, war es ebenfalls notwendig, den Fokus nicht nur auf die Wissenschaft zu legen, sondern Praxispartner in das Projekt zu integrieren. Somit war die Koordination mit organisatorischen, aber auch mit inhaltlichen Aspekten der Zusammenarbeit betraut. Die Aufgaben der Koordination sind in Abbildung 3-69 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass zu den organisatorischen Aufgaben einerseits das administrative Projektmanagement und andererseits der Wissenstransfer innerhalb der Gruppe und nach außen gehören. Die Organisation des internen Wissenstransfers ist Voraussetzung, eine inhaltliche Vernetzung zwischen den Teil- und Subprojekten zu ermöglichen. Die unterschiedlichen Aspekte des externen Wissenstransfers sind vorwiegend Informationen über das Projekt mit Hilfe verschiedener Medien.

3.12.1.1 *Organisatorische Aufgaben der Koordination*

Eine Hauptaufgabe der Koordination ist die organisatorisch/administrative Gestaltung des Projektes. Die dabei anfallenden Aufgaben entsprechen dem üblichen Projektmanagement, wie Zeitpläne erstellen und kontrollieren, das Finanzcontrolling übernehmen und die Organisation und Durchführung verschiedener Veranstaltungen, Tagungen und Treffen. Diese Aufgaben wurden in enger Abstimmung mit der Projektleitung durchgeführt.

Kommunikation

Ein Schwerpunkt lag auf der Organisation einer integrativen Kommunikationskultur. Bedingt durch die verschiedenen Disziplinen, Fachsprachen und Wissenschaftskulturen lagen Wissensbarrieren vor, die abgebaut werden mussten. Im

Laufe des Projektes wurden verschiedene Möglichkeiten ausprobiert, wie die Mitarbeiter am besten Ergebnisse, Erfahrungen und Methoden untereinander austauschen können.

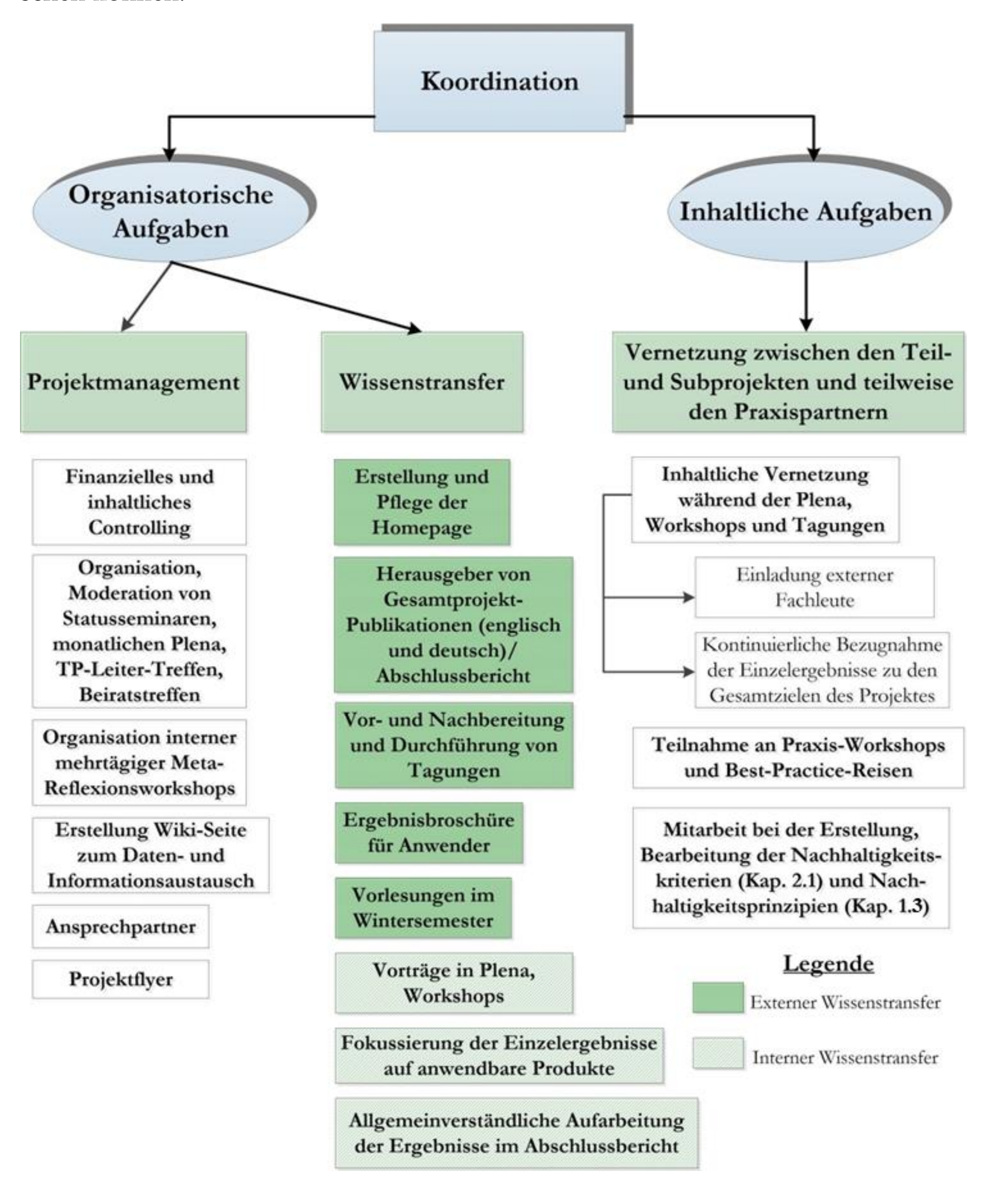


Abbildung 3-69: Aufgaben der Koordination

Ziel war es dabei immer, einen effizienten interdisziplinären Austausch zwischen den Vertretern der unterschiedlichen Disziplinen zu ermöglichen. Die knappen Zeitressourcen, besonders bei den Professoren, mussten bei dem Austausch immer

beachtet werden und stellten einen hohen Anspruch an die Moderation der Treffen. Auch in diesem Hinblick wurden immer wieder die verschiedenen Wissenschaftskulturen deutlich: einerseits entscheidungsgetrieben, andererseits dialoggetrieben. Loibl (2005, S. 116) wies in diesem Zusammenhang auf methodische und sprachliche Unterschiede hin: *„Soziologen haben für Naturwissenschaftler und Ökonomen ungewohnte Arbeitsweisen und Themenzugänge. Dies wird auch im Bereich durch die Form der Ergebnisaufbereitung deutlich."* So wie Loibl (ebd.) konnten auch in diesem Projekt sprachliche Unterschiede festgestellt werden. An dem Begriff ‚Skala' wurden diese Unterschiede mehrmals deutlich. Der Begriff der ‚Skala' wird in den raumbezogenen Naturwissenschaften als Maßstab für naturräumliche Einheiten wie z. B. Dorf vs. Region oder Mikro-, Meso- und Makroklima verwendet. In den Sozialwissenschaften und der Psychologie wird der Begriff ausschließlich als Maßstab einer abgestuften Bewertung oder Rangordnung verwendet. Dabei ist der Raumbezug nicht gegeben. Diese teilweise feinen Unterschiede mussten dementsprechend erst durch Diskussionen im Plenum geklärt werden, wo man sich auch auf eine klärende Begriffsdefinition einigte.

Tabelle 3-31: Kommunikationswege innerhalb des Projektes

Kommunkationswege	**Ziele**	**Intervall/ Zeiten**
Plenum	Informationsaustausch, Teamfindung, Barometer für die Stimmung im Projekt, Vorträge von externen Fachleuten, Integration der verschiedenen Ergebnisse in den Gesamtkontext, Vorbereitung auf Statusseminare, Beiratstreffen u.a.	Monatlich/ 3–4 h
Teilprojektleitertreffen	Strategische Entscheidungen über wichtige Meilensteine, Entscheidungsgremium	¼-jährlich (1-2 h)
Teilprojekttreffen	Austausch innerhalb der Teilprojekte über Ergebnisse, Methoden, inhaltliche Diskussionen	unterschiedlich, nicht kontinuierlich
Projekt-Wiki-Seite	Daten- und Informationsaustausch innerhalb des Projektes	kontinuierlich
Mehrtägiger Meta-Reflexions-workshop	Zusammenführung der Ergebnisse, intensive Reflexion des Bereiches Bioenergie und der eigenen Ergebnisse im Kontext der Nachhaltigkeit, Vorbereitung Folgeantrag, Teamfindung	1x pro Jahr/ 2 Tage außerhalb Göttingens
Beiratstreffen	Austausch mit externen Fachleuten, Reflexion der Ergebnisse aus der Perspektive der Praxis und anderer Erneuerbarer Energieprojekte	1x pro 1,5 Jahre à 6 h

Dem interdisziplinären Anspruch entsprechend wurden die in Tabelle 3-31 erkennbaren Kommunikationswege etabliert. Diese verschiedenen Kommunikationspfade hatten unterschiedliche Ziele und Intervalle. Im Kapitel 3.12.5 werden die verschiedenen Kommunikationswege evaluiert.

Das wichtigste Gremium war das monatliche Plenum, zu dem alle Mitarbeiter eingeladen waren. So wie in anderen inter- und transdisziplinären Projekten, erforderte auch hier die intensive Zusammenarbeit einem enormen Zeitaufwand (Loibl 2005; Defila et al. 2006). Die ungewöhnlich häufigen Treffen (insgesamt 53 Plena innerhalb von 5 Jahren) waren dem heterogenen Aufbau und dem transdisziplinären Charakter des Projektes geschuldet. Sie dienten dem Informationsaustausch, aber auch der Vernetzung innerhalb des Gesamtprojektes. Eine grundlegende Frage der Plena war immer wieder: Wie kann ich meine Ergebnisse, Methoden so aufarbeiten, dass andere Teilprojekte/Fachbereiche diese Informationen verstehen und nutzen können? Somit wurden die spezialisierten Ergebnisse für die Allgemeinheit heruntergebrochen und dadurch ein Austausch darüber erst möglich. Innerhalb der Plena sollten Gedankenanstöße geliefert und Diskussionen angeregt werden. Die vertiefenden bi- und multilateralen Diskussionen wurden dann auf die Teilprojekttreffen verlagert. Eine weitere wichtige Aufgabe der Plena war es, Vertrauen unter den Mitarbeitern aufzubauen, damit eine Integration der verschiedenen Ergebnisse und Methoden möglich wurde. Denn erst mit dem Respektieren unterschiedlicher Wissenschaftskulturen ist die Bereitschaft zum gegenseitigen Verstehen gegeben. Verschiedene Moderationstechniken wurden innerhalb der Plena angewendet, um den Austausch und die Diskussionen zielführend zu organisieren und Ergebnisse besser zu strukturieren. Die einzelnen Teilprojekte präsentierten einmal im Jahr ihre Ergebnisse mit der Prämisse der Allgemeinverständlichkeit und der Relevanz für die Gesamtgruppe.

Eine weitere Form innerhalb des Kommunikationssystems waren die Treffen, bei denen nur die Teilprojektleiter vertreten waren. Bei diesen Treffen wurden wichtige Entscheidungen getroffen und Langzeitpläne erstellt. Die Ausgestaltung von Folgeanträgen, Statusseminaren, Beiratstreffen und Zwischen- und Abschlussberichten wurden ebenfalls in diesem Gremium beschlossen. Innerhalb des Teilprojektleitertreffens wurden dementsprechend alle wichtigen Entscheidungen für den weiteren Fortgang des Projektes getroffen.

Die inhaltlichen Fachdiskussionen innerhalb der Teilprojekte wurden in den Teilprojekttreffen geführt. Dabei waren nur die spezifischen Fachdisziplinen unter sich oder es wurden andere Teilprojekte (siehe z. B. Kap. 3.1) zum bi- und multilateralen Austausch eingeladen. Diese Treffen waren dementsprechend die entscheidenden Arbeitstreffen innerhalb der einzelnen Teilprojekte.

Um einen geeigneten Daten-und Informationsaustausch zu gewähren, wurde eine projektinterne Wiki-Seite angelegt. Alle Protokolle, öffentlichen Präsentationen, Literaturquellen oder teilprojektübergreifende Dokumentationen wurden hier hinterlegt. Besonders Dokumentationen, die immer wieder aktualisiert werden mussten, konnten hier schnell und gemeinsam bearbeitet werden. Alle Protokolle

der Plena, Workshops, Statusseminare und Beiratstreffen waren hier auch für die externen Kooperationspartner erhältlich. Größere Datenpakete konnten auf dieser Seite nicht ausgetauscht werden.

Chancen zum gegenseitigen Austausch und Kennenlernen boten die zweitägigen Meta-Reflexionsworkshops. Aufgabe der Workshops war es immer wieder, die eigene Arbeit zu hinterfragen und die gemeinsamen Zielvorstellungen für die weiteren Arbeiten zu konkretisieren. Die Workshops hatten ebenfalls die Funktion, Problemfelder anzusprechen und Lösungsvorschläge gemeinsam zu erarbeiten. Fragen der interdisziplinären Organisation und Kommunikation waren dabei immer wiederkehrende Aspekte der Diskussion. Dabei wurden Wertfragen aus dem Kontext der unterschiedlichen Disziplinen gerade in Bezug zur Bioenergie diskutiert, die diversen Ansichten dazu ausgetauscht und versucht, die verschiedenen Denkweisen miteinander zu verbinden, ohne dabei die Differenzen zu negieren. Spezielle fantasieanregende Methoden erweiterten den persönlichen Horizont und gaben den Teilnehmern die Möglichkeit, kreativ ihre eigene Arbeit und die der Gesamtgruppe zu reflektieren. Sinn der Workshops war es immer wieder, die Mitarbeiter aus den gewohnten Denk- und Handlungsmustern herauszuholen und dementsprechend ungezwungener und freier über die Ergebnisse und Ziele zu diskutieren. Der Vorteil dieser zwei Tage war ebenfalls, dass Themen innerhalb der Gesamtgruppe oder in Kleingruppen ausdiskutiert werden konnten. Dazu wurden entsprechende Zeitfenster gesetzt, wo sich die verschiedenen Teilprojekte miteinander austauschen konnten. Die Ergebnisse wurden dann in den weiteren Gremien (z. B. Plena) nachgearbeitet und umgesetzt.

Der Beirat des Projektes hatte die Aufgabe, das Verbundforschungsprojekt aus dem Blickwinkel der Praxis oder anderer Forschungsprojekte zu begleiten. Innerhalb des Beirates waren Landwirte, Vertreter der regionalen Verwaltung und verschiedener Fachdisziplinen der Wissenschaft vertreten. Ziel der jährlich stattfindenden Treffen war es ebenfalls, das Gesamtprojekt zu reflektieren und bei möglichen Fehlsteuerungen gegenzulenken. Der intensive Austausch mit den Beiratsmitgliedern war für beide Seiten sehr befruchtend. Für die Gesamtgruppe waren die Beiratstreffen ebenfalls Meilensteine der Zusammenarbeit, denn jedes Teilprojekt musste sich dabei immer wieder auf die Gesamtziele des Projektes beziehen und aufzeigen, welchen Beitrag das Teilprojekt für die Erreichung der Gesamtziele leistet.

3.12.1.2 *Inhaltliche Aufgaben der Koordination*

Neben den organisatorischen Aufgaben bestand ein wichtiger Aspekt der Koordination in der inhaltlichen Zusammenführung der diversen Teilprojekte. Dazu war es notwendig, sich in die verschiedenen Themenbereiche, Methoden und Arbeitsweisen einzuarbeiten, um dann gemeinsame Schnittmengen aufzudecken und Synergien herauszuarbeiten. Der Sinn der übergeordneten inhaltlichen Koordination lag insbesondere darin die Teilprojekte auf die gemeinsamen Ziele zu fokussieren

und neue Denkanstöße bezüglich einer inter- und transdisziplinären Zusammenarbeit zu geben. Die oben beschriebenen notwendigen Kommunikationsformen und Teilnahmen an verschiedenen Teilprojekttreffen und Workshops waren Voraussetzungen für die erfolgreiche Homogenisierung des Gesamtprojektes.

Weiterhin lud der Koordinator gezielt externe Referenten zu unterschiedlichen Themenbereichen ein, um spezifische Fragestellungen, die im Projekt nicht behandelt werden konnten, aber die Arbeit tangierten, mit den Experten zu diskutieren.

Ein wichtiger Aspekt war auch die Diskussion über die Nachhaltigkeit von Bioenergie und die Einordnung der eigenen Arbeit in ein Nachhaltigkeitskonzept. Im Rahmen des Projektes beteiligte sich der Koordinator an der übergeordneten Beschreibung von Nachhaltigkeitskriterien und -prinzipien (s. Kap. 1.3.2, 3.1). Die Formulierung und Ausgestaltung der Kriterien und Prinzipien konkretisierte die interdisziplinäre Zusammenarbeit und ermöglichte eine intensive Diskussion der verschiedenen Themenbereiche über Fachdisziplinen hinweg.

3.12.2 Herausforderungen

Innerhalb eines interdisziplinären Projektes sind unterschiedliche Fachdisziplinen und Praxispartner integriert. In diesem Projekt, indem sozial-, natur-, und wirtschaftswissenschaftliche Methoden und Arbeitsweisen aus dem fachspezifischen Kontext heraus genutzt wurden, waren die größten Herausforderungen die folgenden:

- eine gemeinsame Sprache über die Fachsprachen hinaus zu finden und sich darüber zu verständigen, um letztendlich gemeinsame, aufeinander bezogene Ergebnisse generieren zu können;
- die verschiedenen Methoden zu verstehen, miteinander zu verknüpfen und gegebenenfalls auch in anderen Fachdisziplinen zu nutzen und
- die Arbeiten in den verschiedenen zeitlichen und räumlichen Maßstäben miteinander zu verbinden.

Diese Herausforderungen wurden regelmäßig in den Plena und anderen teilprojektübergreifenden Treffen thematisiert. Ziel des Gesamtprojektes war es, Ergebnisse auf der regionalen Maßstabsebene zu erhalten ohne die lokale/betriebliche Ebene zu vernachlässigen. Somit wurde auf beiden räumlichen Maßstabsebenen gearbeitet. Die zeitliche Ebene war besonders für die Aktionsforschung relevant. In der Anwendung konnten nur wissenschaftliche Ergebnisse genutzt werden, die valide genug waren. Diese Ergebnisse wurden aber erst im Laufe des Projektes erhoben, standen also am Anfang der Beteiligungsprozesse vor Ort in den drei Landkreisen noch nicht zur Verfügung. Somit mussten teilweise Entscheidungen vor Ort ohne diese Ergebnisse getroffen werden.

Die in der Literatur bekannten Vorurteile gegenüber anderen fachdisziplinären Methoden, Herangehensweisen und Wissenschaftskulturen wurden auch in diesem Projekt festgestellt (Schneidewind & Singer-Brodowski 2013, S. 41; Loibl 2005, S.

136). Aufgabe der Koordination war es, im Laufe des Projektes gedankliche Wanderungen in „fremde Disziplinen“ immer wieder zu ermöglichen und effizient zu gestalten (siehe organisatorische Aufgaben). Die Herausforderung bestand auch darin, die fachliche Auseinandersetzung mit Themen und Ergebnissen nicht auf die persönliche Ebene abgleiten zu lassen. Verschiedene Moderationstechniken erleichterten und strukturierten diesen Diskurs und generierten zielführend Ergebnisse. In der ersten Projektphase wurde ein mehrtägiger Moderationsworkshop zu unterschiedlichen Kommunikationstechniken für die Mitarbeiter und den Koordinator durchgeführt. Dadurch wurden besonders die Plena strukturierter und ergebnisorientierter. Loibl (2005) beschreibt eine erfolgreiche interdisziplinäre Zusammenarbeit als eine kontinuierliche Bewegung zwischen Divergenz und Konvergenz. Auch in diesem Projekt lag ein Hauptaugenmerk darauf, die wissenschaftlichen Unterschiede klar zu benennen und gleichzeitig die Gemeinsamkeiten und entstandenen Synergien zu beschreiben; es handelte sich also um ein kontinuierliches Schwingen zwischen Unterschiedlichkeit und Annäherung. Eine große Gefahr bestand darin, die Unterschiede zu verwaschen und eine zu starke Homogenisierung im Laufe der Zeit zu fordern, ohne dass eine wirkliche wissenschaftliche Annäherung stattfand. Dabei war es Aufgabe der Koordination, den verschiedenen Sichtweisen genügend Gehör zu verschaffen und somit ein gleichberechtigtes Nebeneinander zu ermöglichen.

Der Gedanke der Effizienz, besonders der Zeiteffizienz, war dabei anfänglich teilweise kontraproduktiv. Eine auf Effizienz ausgelegte Kommunikation ist in der ersten Phase der interdisziplinären Annäherung ein ungünstiger Weg. Das bedeutet nicht, dass die Kommunikation nicht ergebnisorientiert sein soll, ganz im Gegenteil, aber das Ergebnis sollte anfänglich eher auf weiche Faktoren und Verständigung abgestimmt sein. Der Dialog und der Aufbau von Vertrauen innerhalb der Projektgruppe hatten dementsprechend in den ersten Monaten Priorität. Im Antrag des Projektes wurden viele und zeitintensive Treffen vereinbart. Diese Intensität der Treffen kollidierte oftmals mit dem knappen Zeitbudget, besonders der Teilprojektleiter. Insofern war es eine Herausforderung, die unterschiedlichen Erwartungen an die Projekttreffen für alle Seiten gleichermaßen zu erfüllen.

Eine weitere Herausforderung war die Notwendigkeit, die Ergebnisse in anwendbare Produkte und Resultate zu transferieren. Ziel der Jahre vier und fünf war es, die Ergebnisse nicht nur für die Wissenschaft aufzuarbeiten, sondern praxisbezogene Resultate daraus zu entwickeln. Dieser Anwendungsbezug beinhaltete eine klare Produktfokussierung, inklusive der sprachlichen Anpassung für unterschiedliche Zielgruppen. Dazu wurde innerhalb der Koordination eine spezielle Wissenstransfergruppe gegründet, um den Anwendungsbezug der Ergebnisse zu begleiten und zu forcieren. Dieses Buch ist ebenfalls ein Ergebnis der praxisrelevanten Produktfokussierung.

3.12.3 Wissenstransfer

Zu den Zielen der Koordination gehörte die Zusammenführung der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Fachrichtungen sowie die Sicherstellung deren Anwendbarkeit in der außerwissenschaftlichen Praxis. Die einzelnen Teilprojekte hatten dementsprechend die Aufgabe, die wissenschaftlichen Ergebnisse in anwendbare Instrumente und Produkte zu überführen, was, in Abhängigkeit von Forschungsgegenstand und -kultur, mit höchst unterschiedlicher Intensität und auf vielfältige Art und Weise vorgenommen wurde.[30] Als Produkte oder Instrumente können unterschiedliche Ergebnisse verstanden werden, z. B. Open-Source-Software-Tools, anwendbare Modelle und Handlungsempfehlungen. Diesbezüglich gab es innerhalb der Koordination zur Unterstützung der Teilprojekte und zur Koordination innerhalb des Gesamtprojektes den Bereich „Wissenstransfer".

Im Einzelnen wurden folgende Aufgaben im Bereich Wissenstransfer wahrgenommen:

- Zusammenführung der Ergebnisse der Teilprojekte durch Zuordnung der erarbeiteten Instrumente zueinander und genaue Bestimmung ihres Anwendungsfeldes und Nutzens;
- Allgemeinverständliche Aufbereitung der erarbeiteten Instrumente für potenzielle Anwender in der außerwissenschaftlichen Praxis (für einzelne Instrumente).

3.12.3.1 *Problembeschreibung*

Vor dem Hintergrund der fachübergreifend zusammengestellten Projektgruppe sowie der Anwendungsorientierung ergeben sich für das Gelingen eines Wissenstransfers folgende Problemstellungen:

- Eine für das wissenschaftliche Arbeiten unübliche Fokussierung auf eine Anwendungsfähigkeit der zu erarbeiteten Instrumente hinsichtlich Verständlichkeit (wissenschaftliche Fachsprache versus Sprachverwendung und -verständnis in der außerwissenschaftlichen Praxis; wissenschaftliche Ansprüche an Umfang und Komplexität versus Praktikabilität).
- Die Mitarbeiter im Bereich Wissenstransfer können nicht über ein Wissen verfügen, das sämtliche Fachdisziplinen umfasst und die konkreten Anwendungsfelder in der außerwissenschaftlichen Praxis abdeckt.

Hinzu kommen unterschiedliche Fachsprachen, wissenschaftliche Herangehensweisen und Forschungsinteressen (Fachkulturen) der beteiligten Fachrichtungen. Die Organisation und Koordination der fachübergreifenden Verständigung und Zusammenarbeit erfolgte aufgrund ihrer grundlegenden Bedeutung für das Gelin-

[30] Die Ansätze und Aktivitäten innerhalb der einzelnen Teilprojekte zum Wissenstransfer werden in diesem Kapitel nicht erläutert. Stattdessen werden hier allein die teilprojektübergeordneten Bestrebungen vorgestellt.

gen des Gesamtprojektes innerhalb der Koordination des Gesamtprojektes. Der Bereich Wissenstransfer baute darauf auf und konzentrierte sich auf die fachübergreifende Verständigung und Zusammenarbeit anhand der konkreten Instrumente (siehe Tab. 3-34).

Tabelle 3-35: Zielebenen Wissenstransfer in Ergänzung zum Bereich der Gesamtkoordination

Bezugsgruppe / Aufgabe	Innerhalb der Projektgruppe		Für die Praxis anwender
	Koordination	**Wissenstransfer**	
Zusammenführung	Verknüpfungen, Bezüge und Abhängigkeiten erkennen und bearbeiten	**Zuordnung der Instrumente zueinander**	**Definition von Anwenderkreis und -nutzen**
Verständlichkeit	Unterschiedliche Fachkulturen verständlich machen	**verständlich machen der Instrumente**	**allgemeinverständlich und verfügbar machen**

3.12.3.2 *Methoden*

Vor dem Hintergrund der angestrebten Ziele und der damit verbundenen Problemstellungen wurde im Bereich Wissenstransfer ein Ansatz verfolgt, der auf eine organisierte Auseinandersetzung mit den Zielen des Wissenstransfers und einer diesbezüglichen Sensibilisierung innerhalb des Projektteams abzielte. Darüber hinaus wurde eine beratende Begleitung für die Wissenschaftler angeboten.

Voraussetzung für die Organisation des Wissenstransfers war, dass die zu erreichenden Projektergebnisse eine gewisse Entwicklungsreife sowie die beteiligten Wissenschaftler einen bereits vertieften Kenntnisstand über ihren Teilbereich erlangt hatten. Erst dann zeigten sich konkrete Ansatzpunkte zur Zusammenführung der Ergebnisse und die Möglichkeit zur genaueren Festlegung des Anwenderkreises und -nutzens. Darüber hinaus stiegen mit der Dauer des Forschungsprojektes die Fähigkeiten der Mitarbeiter zur Zusammenführung von Ergebnissen und zur fachübergreifenden Zusammenarbeit. Als Ansatzpunkt wurden die individuellen Forschungsschwerpunkte und -interessen der beteiligten Wissenschaftler gewählt, die die Ziele des Wissenstransfers eigenverantwortlich und für ihre Teilbereiche selbständig koordiniert verfolgt haben.

Die Aktivitäten im Bereich Wissenstransfer begann im Juni 2012, rund eineinhalb Jahre vor Projektende und verliefen in methodischen Schritten, die in Tabelle 3-36 erläutert sind.

Leitfadengestützte Interviews

Im ersten Schritt war es das Ziel, die zu erwartenden Ergebnisse in den beteiligten Fachgebieten in ihrem aktuellen Stand allgemein zu erfassen und erläutern zu lassen. Zudem wurden die aktuellen Bestrebungen zum Erreichen der TP-spezifischen Wissenstransferziele erfragt, was insbesondere zur Sensibilisierung der Wissenschaftler für diese Ziele diente.

Tabelle 3-32: Überblick Aktivitäten im Bereich Wissenstransfer

Zeitrahmen	Aktivität	Methode
06/2012 bis 09/2012	Erfassung des aktuellen Entwicklungsstands, Sensibilisierung für die Wissenstransferziele.	12 leitfadengestützte Interviews in allen beteiligten Fachgebieten
09/2012 bis 11/2012	Rückkopplung und Diskussion der Interviewergebnisse in die Projektgruppe	3 Zwischen- bzw. Ergebnisberichte in den Projektplena
10/2012 bis 02/2013	Bedarfsorientierte Auseinandersetzung mit den Wissenstransferzielen	Fachspezifische sowie fachübergreifende Gesprächsrunden
03/2013 bis 10/2013	Fortlaufende Veranschaulichung und Diskussion der geplanten Schritte zum Erreichen der Wissenstransferziele	Wissenstransfer-Matrix
08/2013	Zusammenführung der Ergebnisse aus den Fachgebieten. Herstellung von Bezügen für eine Anwendungsreihenfolge	Ganztägiger Projektworkshop
10/2013	Allgemeinverständliche Aufbereitung einzelner Produkte/ Instrumente für Anwender	Produktsteckbriefe in Anwenderbroschüre
2013	Angebot zur Überprüfung von Textbausteinen auf Allgemeinverständlichkeit	Redigieren der Texte durch fachexterne wissenschaftliche Mitarbeiterin

Um dies zu erreichen wurde die Methode des leitfadengestützten Interviews gewählt, bei dem die Interviewten weitreichende Freiräume in der Beantwortung der Fragen haben. Damit sollte zum einen erreicht werden, dass sich die Interviewen-

den ein möglichst umfassendes Bild der Aktivitäten machen können, zum anderen, dass die Interviewenden aufgrund ihrer Fachfremdheit den Aussagen folgen und ggf. durch Nachfragen verstehen können. Als Interviewpartner wurden in erster Linie die wissenschaftlichen Mitarbeiter ausgewählt, da diese durch das unmittelbare und tagtägliche Arbeiten an ihrem Forschungsgegenstand die praxisnächsten Einblicke versprach. Die Interviews wurden größtenteils in den Büros der Mitarbeiter von einem Interviewer unter Beisein eines Protokollanten durchgeführt. Zudem wurden die Interviews zur besseren Auswertbarkeit aufgezeichnet. Zur Vorbereitung auf die Interviews dienten den Interviewenden die fachspezifischen Projektbeschreibungen aus dem Forschungsantrag. In den zwölf durchgeführten Interviews wurden folgende Aspekte thematisiert:

1. Es wurde sich vergewissert, ob nach wie vor an dem geplanten Instrument, das im Antrag genannt war, gearbeitet wurde, oder ob sich die anwendungsbezogenen Ziele verändert hatten.
2. Der aktuelle Entwicklungsstand des Instruments auf dem Weg zur Fertigstellung wurde abgefragt.
3. Die potenzielle Anwendergruppe sollte näher beschrieben werden.
4. Die räumliche Bezugsebene, auf der das Instrument Anwendung finden sollte, wurde abgefragt (Schlag- oder Betriebsebene, Dorf- oder Regionalebene).
5. Der Nutzen des Instruments für den Anwender wurde erfragt, außerdem die Problemstellung, bei dem es den Anwender unterstützen kann.
6. Eine mögliche Validierung in der Praxis wurde thematisiert, die gewährleisten sollte, dass das Instrument verständlich und anwenderfreundlich sein würde und dass der versprochene Nutzen tatsächlich gewährleistet ist.
7. Zudem wurde nach Bezügen zu anderen Instrumenten gefragt und um eine Einordnung in den Gesamtzusammenhang des Projektes gebeten.

Im Oktober und November 2012 wurden die Ergebnisse mittels der Protokollnotizen und der Audioaufnahmen ausgewertet. Dafür wurde ein einheitliches Auswertungsschema genutzt. Ausgehend von den Projektbeschreibungen aus dem Forschungsantrag wurde:

1. ein Abgleich der Sollformulierungen aus dem Forschungsantrag mit der Forschungspraxis vorgenommen;
2. eine Bewertung der Interviewaussagen hinsichtlich ihrer Klarheit und Stimmigkeit im Hinblick auf die abgefragten Aspekte vorgenommen. (Ist beispielsweise die räumliche Bezugsebene klar festgelegt und in ihrer Auswahl stimmig zum angestrebten Nutzen?);
3. das Vorhandensein eines konkreten, stimmigen Zeitplans für das Erreichen der Wissenstransferziele überprüft.

Die Auswertung erfolgte bei Interpretationsspielräumen (zum Beispiel hinsichtlich dessen, was klar und stimmig bedeutet) nach subjektiven Bewertungsmaßstäben

der Auswertenden. Abschließend wurden aus den Auswertungsergebnissen ggf. Handlungsempfehlungen abgeleitet, die die Fachbereiche bei der Zielerreichung bezüglich des Wissenstransfers unterstützen sollten.

Die Auswertung machte deutlich, dass der Fokus der Anwenderorientierung von den Projektmitarbeitern das Einnehmen einer für Wissenschaftler ungewohnten Perspektive verlangt, im Gegensatz zur rein wissenschaftlichen Fokussierung gängiger Forschung. Besonderer Unterstützungsbedarf wurde insbesondere bei der Festlegung auf einen konkreten Anwenderkreis, der Frage nach den Verbreitungswegen hin zu den Anwendern sowie der Sicherstellung einer bestmöglichen Nutzerfreundlichkeit ausgemacht. Zudem zeigte sich, dass die Bezüge einzelner Instrumente untereinander und die Arbeit über die eigenen Fachgrenzen hinweg noch weiter verstärkt werden könnten.

Ergebnisberichte in den Projektplena

Die Interviewergebnisse wurden im Oktober und November 2012 in zwei fachübergreifenden Plenumssitzungen vorgestellt. Diese Rückkopplung ins Projektplenum erfolgte – für jedes Teilprojekt einzeln aufbereitet – an Hand folgender Anhaltspunkte:

- Welches Instrument wird erarbeitet?
- Wie ist der aktuelle Entwicklungsstand des Instruments?
- Welche Form der Veröffentlichung ist für das Instrument vorgesehen?
- Wie konkret ist der weitere Entwicklungsprozess des Instruments?
- Wie wird die Anwendungsfreundlichkeit des Instruments sichergestellt?
- Handlungsempfehlungen für das Teilprojekt / Fazit

Durch diese Darbietungsform „für alle" war ein erster Schritt in Richtung gegenseitiger Verständigung getan, der nötig war, um die Vielfalt der Instrumente für den Anwender in einen logischen Ablauf bringen zu können. Jedes Fachgebiet erhielt so einen Überblick, welche anderen Werkzeuge mit welchen Zielgruppen und welchem Zweck neben dem ihrigen bearbeitet wurde. Als ein Nebeneffekt der Interview- und der Plenumssituation kann die Reflexion der eigenen Arbeit in den Fachgebieten im Hinblick auf die Gesamtprojektziele genannt werden.

Fachspezifische sowie fachübergreifende Gesprächsrunden

Aus den Erkenntnissen der Interviewauswertung wurde für einige Fachbereiche der Bedarf an einer intensiveren Auseinandersetzung mit den Zielen des Wissenstransfers abgeleitet. Zum Teil wurde dieser Bedarf auch in der fachübergreifenden Zusammenarbeit gesehen. Zur weiteren Bearbeitung wurden Gesprächsrunden vorgesehen. Diese fanden – je nach Bedarf – durch den Bereich Wissenstransfer begleitet oder auch ohne Begleitung statt. Insbesondere die begleiteten Gesprächsrunden dienten dazu, die ausgesprochenen Handlungsempfehlungen durch das Besprechen der Auswertungsergebnisse verständlich und umsetzbar zu machen.

Als von den Projektmitarbeitern äußerst positiv wahrgenommen und zahlreich genutzt wurde die Möglichkeit, zu einem festgelegten Termin fachübergreifende Gesprächsrunden eigenständig zu organisieren, bei denen Gesprächspartner und -inhalte selbst festgelegt werden konnten.

Wissenstransfer-Matrix (Abb. 3-70)

Nach der Rückkopplung der Interviewergebnisse und der intensiven Auseinandersetzung mit den ausgesprochenen Handlungsempfehlungen wurde mit dem nächsten Schritt – der Erarbeitung einer Wissenstransfermatrix - das Ziel verfolgt, eine fortlaufende und transparente Veranschaulichung und Diskussion der geplanten Schritte zum Erreichen der Produktanwendung im Projekt zu etablieren. Dies geschah erneut vor dem Hintergrund, dass die angestrebte Anwendungsorientierung eine immer wiederkehrende Sensibilisierung und Auseinandersetzung mit dieser Herausforderung benötigt.

In der Matrix wurden für jedes einzelne Fachgebiet alle für den Wissenstransfer relevanten Aspekte erfasst, entsprechende Arbeitsfortschritte fortgeschrieben und in den monatlichen Plena vorgestellt. Mit Hilfe der Matrix konnte somit auch etwaiger Unterstützungsbedarf durch den Bereich Wissenstransfer abgeleitet werden.

Nachstehende Aspekte wurden in der in vier Sinnabschnitte unterteilten Matrix erhoben:

A. Beschreibung des Instruments
1. Teilprojektnummer
2. Bezeichnung des Instruments
3. Skalenebene(n): Schlag/Betrieb - Dorf/Kommunal – Region

B. Anwendungsbezug des Instruments
4. Potenzieller Anwenderkreis
5. Geplante Verbreitungswege hin zu den Anwendern
6. Nutzen (Mehrwert) des Instruments für den Anwender
7. Maßnahmen zur Erreichung einer möglichst guten Verständlichkeit für den Anwender
8. Bezüge des Instruments zu anderen Instrumenten im Projekt

C. Maßnahmen zur Sicherstellung der Anwenderfreundlichkeit
9. Maßnahmen zur Erreichung des beabsichtigten Nutzens
10. Maßnahmen zur Erreichung der Allgemeinverständlichkeit
11. Maßnahmen zur Herstellung der Bezüge zu anderen Instrumenten im Projekt

D. Zeitplanung
12. Zeitpunkt der Fertigstellung des Instruments
13. Integration des Instruments in den Arbeitsalltag des Anwenders

Die Matrix wurde auf einem Plenum im März 2013 zunächst allen Beteiligten vorgestellt und erläutert. Die Teilprojekte füllten die Matrix nach gemeinsamer Diskussion erstmalig im Plenum aus und aktualisierten anschließend den Stand ca.

einmal monatlich. Zum Teil wurde hierfür telefonisch nachgefragt, wobei die Telefonate oft zu einer sprachlichen Klärung von Details beitragen konnten, und so eine allgemeinverständliche Ausdrucksweise gefördert wurde.

Die unterste Zeile in den Matrizen bildet ein farblich markiertes „Ampelsystem“, mit dem – je nach Sinnabschnitt – unterschiedliche Aspekte zum Ausdruck kommen. Mit Hilfe des Ampelsystems konnten die unterschiedlichen Arbeitsfortschritte auf einen Blick erfasst werden und es war unter den Fachgebieten eine einfachere Vergleichbarkeit in den Wissenstransfer-Bemühungen möglich.

In den Bereichen A „Beschreibung des Instruments“ sowie B „Anwendungsbezug des Instruments“ haben die Farben folgende Bedeutung:

- Grün: Verständlicher und adäquater Eintrag vorhanden
- Gelb: Eintrag vorhanden, jedoch nicht verständlich oder inadäquat
- Rot: Kein Eintrag.

Abweichend von den ersten beiden Sinnabschnitten bringt das Ampelsystem in den Bereichen C „Maßnahmen zur Sicherstellung der Anwenderfreundlichkeit“ und D „Zeitplanung“ folgendes zum Ausdruck:

- Grün: Maßnahmen erfolgt
- Gelb: Maßnahmen geplant
- Rot: Keine Maßnahmen geplant.

Zudem wurden in den Bereichen C und D die unterste Zeile in Einzelzellen unterteilt, um einzelne Schritte (Meilensteine) auf dem Weg zur Umsetzung der Maßnahmen verdeutlichen (wenn möglich mit Datumsangaben) zu können.

Ganztägiger Projektworkshop

Zur Zusammenführung der Ergebnisse aus den beteiligten Fachgebieten sowie zur Herstellung von Anwendungsbezügen der Instrumente wurde im August 2013 die gesamte Projektgruppe zu einem ganztägigen, moderierten Workshop geladen.
Dabei haben die Teilnehmenden in Gruppenarbeit ihre Instrumente für eine idealtypische Praxisanwendung in eine chronologische Nutzungsreihenfolge gebracht. Dies geschah sowohl für die regionale als auch für die lokale Anwendung der Instrumente. Darüber hinaus wurde abgefragt, welche konkreten Anwendungsschritte für die einzelnen Instrumente notwendig bzw. sinnvoll sind. Alle Ergebnisse wurden auf Metaplanwänden festgehalten und sind in einer fotografischen Workshop-Zusammenfassung zur weiteren internen Verwendung dokumentiert worden.

Insgesamt diente der Workshop auch dazu, die Ergebnisse des Projektes allen sichtbar zu machen und detaillierte Anwendungsverfahren für die Instrumente zu entwickeln und für den Abschlussbericht vorzubereiten.

Nr.			
1	TP	A3.1	A3.1
2	Produkt	Handlungsempfehlungen (Kondensat der Erfahrungen aus der Aktionsforschung zur Sensibilisierung der Bevölkerung zu Chancen und Grenzen der Bioenergienutzung	Handlungsempfehlungen (Kondensat der Erfahrungen aus der Aktionsforschung zur Sensibilisierung d
3	SkalenebeneN	regional (LK)	
4	Beabsichtigte Anwender	Kommunalpolitik/kommunale Entscheidungsträger	
5	(Aktive) VerbreitungswegE	Veröffentlichung über das Internet (primär IZNE-Seite), in gedruckter Form bei der Tagung, Verweis auf die Internetveröffentlichung über Produktdatenblatt und Abschlussbericht, evtl. auch als Broschüre über das MWK	
6	Beabsichtigter Nutzen, evtl. Nebennutzen	Weitertragen der Erfahrungen aus 5 Jahren Aktionsforschung über das Projekt hinaus, Sensibilisierung für regionale ..., partizipative EE-Projekte	
7	Verständlichkeit	Für Kommunalpolitiker/Praktiker verständliche Sprache	
8	Bezüge zu anderen Produkten	A2.1, 2.2	
9	Nutzen-Überprüfung	Verschicken an Partner aus den beteiligten Landkreisen Anfang September, Rückmeldungen einholen zur Verständlichkeit des Textes und zur Nützlichkeit der Empfehlungen &Einarbeitung in den Text bis Ende September	01.09. 30.09.
10	Verständlichkeitsüberprüfung	Verschicken an Partner aus den beteiligten Landkreisen Anfang September, Rückmeldungen einholen zur Verständlichkeit des Textes und zur Nützlichkeit der Empfehlungen &Einarbeitung in den Text bis Ende September	01.09. 30.09.
11	Herstellung der Bezüge zu anderen Produkten	vor Ort, interessiert; wo es passt, werden Produkte anderer TP in PW inkl. Vorgestellt	
12	Fertigstellung Produkt	Fertigstellung des Textes bis Ende August 2013, Endfassung bis Ende September 2013	30.09.
13	Aktive Verbreitung des Produktes	Druck in geringer Auflage sowie Bereitstellen über das Internet bis zur Tagung	15.10. 15.10.

Abbildung 3-70: Beispielmatrix eines Teilprojektes

Produktsteckbriefe

Einige Produkte wurden in der gemeinsamen Broschüre „Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Bioenergienutzung – Instrumente zur Entscheidungsunterstützung" zusammengestellt und veröffentlicht (IZNE 2013). Ziel der Broschüre ist es, die verschiedenen Produkte/Instrumente kurz vorzustellen und zu erläutern, welche Probleme damit bearbeitet werden können. „Diese Broschüre wendet sich u.a. an Landwirte, Regionalplaner, Verwaltungen, Anlagenbetreiber, Naturschutzverbände, Ingenieurbüros und interessierte Bürger. Sie zeigt steckbriefartig einige wichtige Nachhaltigkeitsaspekte sowie Instrumente auf, die bereits bei der Bioenergie-Konzeptentwicklung und Projektplanung hilfreich sein können. Die Entscheidung wird dem Nutzer damit nicht abgenommen, aber die vorgestellten „Produkte" ermöglichen ein Abwägen verschiedener alternativer Konzepte aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit und erhöhen die Transparenz des Entscheidungsprozesses. In der Broschüre werden u. a. Softwaremodelle vorgestellt, die teilweise ‚open source' genutzt werden können (BioSTAR sowie Software zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung). Weiterhin werden Handlungsempfehlungen bezüglich ökologischer Aspekte des Energiepflanzenbaus sowie Hinweise zur wirtschaftlichen Realisierung von Wärmenutzungskonzepten vor Ort gegeben. Im Kapitel „Organisation der Erneuerbare Energie-Transformation auf regionaler Ebene" werden Prozessschritte aufgezeigt, wie eine Umstellung auf Erneuerbare Energien in Landkreisen und Kommunen umgesetzt werden kann.

Allgemeinverständlichkeit des Abschlussberichtes

Um den Abschlussbericht des Forschungsprojekts möglichst anwendungsfreundlich zu gestalten, wurde dieser nicht wie ein klassischer Forschungsabschlussbericht geschrieben, indem jedes Teilprojekt nacheinander seine überwiegend theoretischen Erkenntnisse darlegte. Stattdessen wurde versucht, die verschiedenen Arbeitspakete miteinander verknüpft darzustellen, indem übergreifende, anwendungsorientierte Leitfragen gemeinsam aus dem Blickwinkel verschiedener Fachgebiete beantwortet wurden. Die Einzelkapitel wurden verschmolzen, indem sie von einer erfahrenen fachexternen Projektmitarbeiterin auf Allgemeinverständlichkeit geprüft und die Autoren immer wieder gebeten wurden, Fachworte durch allgemeinverständlichere Ausdrücke zu ersetzen, Spezialfälle zu verallgemeinern, Kontexte zu erläutern etc. Dieses Korrekturlesen wurde ebenfalls in mehreren „Rückmelde-Runden" seit Mai 2013 vorgenommen. Dabei wurden auf einer Plenumssitzung im Mai exemplarisch typische „Darstellungsfehler" anhand zahlreicher Beispiele von ersten Textentwürfen aus dem Plenum gezeigt und mögliche bessere Alternativen dargelegt.

3.12.3.3 *Ergebnisse*

Im Folgenden werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Bereich Wissenstransfer vorgestellt. Vor dem Hintergrund der gesetzten Ziele, die Ergebnisse der Teilprojekte zusammenzuführen, ihre Anwendungsfelder und ihren Nutzen zu

bestimmen sowie eine allgemeinverständliche Aufbereitung für außerwissenschaftliche Praxisanwendung zu gewährleisten, wurden folgende Ergebnisse erarbeitet:

- Thematisierung der Aufgaben und Ziele des Wissenstransfers (zusammen mit den Projektmitarbeitern)
- Intensivierung der fachübergreifenden Zusammenarbeit
- Zusammenführung der Ergebnisse der Teilprojekte an zentralen Schnittpunkten
- Festlegung von Entscheidungsabläufen über mehrere Instrumente hinweg.
- Bestimmung der potenziellen Anwenderkreise sowie der Nutzen für alle praxisorientierten Instrumente.
- Erstellung von Arbeits- und Zeitplänen für die Überprüfung des Anwendernutzens und der Anwenderfreundlichkeit
- Thematisierung der Allgemeinverständlichkeit in mehreren Plena anhand von konkreten Beispielen
- Unterstützung einzelner Teilprojekte bei der Textarbeit

Die Ergebnisse des Wissenstransfers wurden in verschiedenen Produkten festgehalten, die zum einen der internen Koordination dienten, zum anderen aber auch den potenziellen Anwendern in der Praxis zur Verfügung stehen und allesamt direkt oder indirekt in diesen Abschlussbericht eingeflossen sind:

- Produktsteckbriefe
- Wissenstransfer-Matrix

Mit Blick auf die eingangs beschriebenen Problemstellungen lässt sich festhalten, dass die Anwendungsorientierung des Projektes tatsächlich eine Herausforderung für alle Beteiligten darstellte. So zeigte sich in der Auswertung der Interviews, dass den Wissenschaftlern insbesondere die genaue Bestimmung und Festlegung des potenziellen Anwenderkreises in fast allen Teilprojekten schwerfiel. Auch die Erreichbarkeit der Anwender im Sinne einer möglichst praxisnahen Verfügbarmachung des entwickelten Instruments bereitete den Beteiligten oftmals Schwierigkeiten. In beiden Sachverhalten galt es, übliche Denkmuster und Vorgehensweisen zu erweitern, weil nicht nur die Wissenschafts- bzw. Fachgemeinde über Veröffentlichung, Vorträge etc. erreicht werden sollten. Zudem fiel auf, dass die Ansprüche an Fachsprachlichkeit und Komplexität der Texte teils deutlich reduziert werden mussten, um eine Allgemeinverständlichkeit zu gewährleisten.

Bezüglich der Problemstellungen stellten sich zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen transdisziplinär und nicht-transdisziplinär arbeitenden Teilprojekten heraus. Diejenigen Teilprojekte, die aufgrund ihrer Konzeption unmittelbar vor Ort aktiv waren (z. B. mit Landwirten, der Bevölkerung etc.) hatten deutlich weniger Schwierigkeiten bei der Bewältigung der Problemstellungen. Dies wurde in einem Interview damit begründet, dass man im Miteinander mit den Akteuren vor

Ort unmittelbar dazu gezwungen sei, verständlich zu sein und anwendungsorientiert zu denken, um eine zielführende Zusammenarbeit gewährleisten zu können.

Zusammengefasst konnte im Zuge der Interviews ein von Teilprojekt zu Teilprojekt sehr unterschiedlicher, insgesamt aber hoher Unterstützungsbedarf für den Bereich Wissenstransfer abgeleitet werden.

Als hilfreich hat sich hingegen die Herausforderung erwiesen, dass die Mitarbeiter im Bereich Wissenstransfer keine Experten für sämtliche Fachdisziplinen und die konkreten Anwendungsfelder in der außerwissenschaftlichen Praxis sein konnten. Dies führte zu der Notwendigkeit, sich intensiv mit den einzelnen Teilprojekten und den Mitarbeitern dort zu beschäftigen. In den Interviews und Gesprächen waren alle Beteiligten dazu gezwungen, sich um gegenseitige Verständigung zu bemühen und sich entsprechend verständlich auszudrücken. Dies trug gewissermaßen in sich bereits zur Sensibilisierung für die Wissenstransferziele bei und stellte darüber hinaus eine Übung für interdisziplinäres Arbeiten und allgemeinverständliches Formulieren dar.

3.12.3.4 *Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Projekte*

Das Vorgehen im Bereich Wissenstransfer hat sich insgesamt bewährt und lässt sich in Ablauf und Methodik auf andere inter- wie auch transdisziplinäre Projekte übertragen. Insbesondere der Methodenmix aus leitfadengestützten Interviews, fach- und fachübergreifenden Gesprächsrunden, Plena- und Workshopsitzungen sowie die Etablierung der Wissenstransfer-Matrix trugen zu einer intensivierten Zusammenarbeit, einem reflektierten Austausch und zur erhöhten Sensibilität für den Wissenstransfer bei. Dabei tritt vor allem der *„produktive, methodische Wechsel zwischen Klein- und Großgruppensituationen"* (Loibl 2005, S. 132) als nutzbringend hervor. Zudem konnte bestätigt werden, dass es sinnvoll ist, mit den Herausforderungen des Wissenstransfers erst nach einer gewissen Reifung des Projektes zu beginnen (vgl. hierzu auch Loibl 2005, S. 118).

Sehr zu empfehlen ist, anwendungsorientierte Ergebnisse frühzeitig unter Beteiligung von späteren Anwendern auszuarbeiten, beispielsweise durch die Möglichkeit zur Feedbackgabe. *„Gemeinsame Veranstaltungen mit Vertretern der Zielgruppe, Nutzung ihrer Medien und verständliche Sprache waren neben frühzeitiger Bedürfnisklärung bei den Anwendern die wichtigsten Mittel, […] um die Verbreitung der Forschungsergebnisse in die Praxis zu unterstützen."* (Loibl, 2005, S. 123). Dieser Einbezug von Praxispartnern fand in diesem Projekt nur punktuell statt und sollte zur Regel gemacht werden. Ebenfalls empfehlenswert ist eine rechtzeitige Überlegung, über welche Verbreitungs- und Kommunikationswege die Ergebnisse zum Anwender gelangen sollen. Hierbei sind eine Vielzahl von Möglichkeiten denkbar, wie beispielsweise das Hinzuziehen von Wissenschaftsjournalisten, der direkte Weg über Praxispartner, über Zielgruppenveranstaltungen oder auch Medienberichte (Loibl, 2005, S. 123f).

3.12.4 Organisation der Ergebnissynthese

Die Ergebnissynthese ist neben den Einzelergebnissen ein Teil der Quintessence eines inter- und transdisziplinären Verbundprojektes und somit von zentraler Bedeutung (Defila et al. 2006). Die Organisation dieser Synthese über den gesamten Projektzeitrahmen gehört mit Sicherheit zu den anspruchsvollsten Aufgaben der Koordination.

Im Rahmen der unterschiedlichen Kommunikationspfade wurde hier von Beginn an an einer Zusammenführung der Ergebnisse gearbeitet. Die hohe Anzahl der Plenatreffen und mehrtägigen Workshops verdeutlicht diese kontinuierliche Arbeit an der Ergebnissynthese. Wie sich im Lauf des Projektes zeigte, war die anfängliche gemeinsame Zielsetzung des Gesamtprojektes noch zu unklar und zu fragmentiert. Diese gemeinsame Zielsetzung wurde im Rahmen eines mehrtägigen Workshops am Anfang des Projektes noch einmal konkretisiert. Durch externe übergeordnete Änderungen (Veränderungen des EEG, Akzeptanzveränderungen gegenüber der Bioenergie, neue wissenschaftliche Ergebnisse) war das Thema Bioenergie im Projektzeitraum einer hohen Dynamik ausgesetzt. Diese Dynamik beeinflussten die Zielsetzungen der einzelnen Teil-, aber auch des Gesamtprojektes. Diese reflexive Anpassung der Ziele war besonders wichtig in den transdiziplinären Teilprojekten, da die Praxispartner ihre Interessen und Ziele an den externen übergeordneten Veränderungen kurzfristiger anpassen mussten[31].

Defila et al. (2006, S. 124) beschreiben vier Methoden der Synthesebildung:

- Typ ‘System’
- Typ ‘Gruppe’
- Typ ‘Aushandlung’
- Typ ‘Projektleitung’[32].

Innerhalb des Projektes wurden alle vier Formen angewendet. Beim Typ ‚System‘ werden die Ergebnisse in bestehende Theorien und Methoden eingefügt und miteinander verbunden. Beispiele hier sind u.a. die Szenarien der Biomasseentwicklung in der Region Hannover (siehe Kap. 3.5.5), die Biomassepotenzialberechnungen in den Modelllandkreisen (siehe Kap. 3.4), die Entwicklung des Stoff- und Energiestrommodells (siehe Kap. 3.2) und die Multikriterielle Entscheidungsunterstützung (MCDA, siehe Kap. 3.1). Bei allen Beispielen flossen Daten und Ergebnisse aus anderen Teilprojekten und Fachdisziplinen ein und wurden mit den bestehenden Theorien und Methoden verwoben. Auch die Gruppenvernetzung wurde innerhalb des Projektes intensiv verfolgt. Gerade innerhalb der Plena und mehrtägigen Workshops war dieses Instrument erfolgreich. Durch die stetigen intensi-

[31] So wurde in den Modelllandkreisen, bedingt durch eine schwindende Akzeptanz und Förderung der Bioenergie, immer häufiger ein Gesamt-Erneuerbare-Energien-Konzept gefordert.

[32] Genaue Beschreibungen der verschiedenen Verfahren zur Synthesebildung in Defila et al. (2006, S. 124) und Krott (1996, S. 90pp).

ven Diskussionen und Austauschprozesse kam es immer wieder zu neuen gemeinsamen Schnittmengen und Zusammenhängen innerhalb der Gruppe. Da sich gerade in der zweiten Phase des Projektes die Teilnehmerzahlen an den Plena und Workshops verringerte, wurde eine tragfähige Gruppengröße für diese Gruppen-Diskussionsprozesse erreicht [33]. Aushandlungsprozesse waren innerhalb des Gesamtprojektes und teilweise innerhalb der verschiedenen Fächer der Teilprojekte an der Tagesordnung. Dabei verständigten sich die Mitarbeiter verschiedener Disziplinen und Teilprojekte und stellten Verbindungen zu angrenzenden Fächern her. Diese Aushandlungsprozesse wurden intensiv in den Plena, den Teilprojekttreffen und den Workshops angeregt. Moderierte Kleingruppenarbeiten zu festgelegten Themen bildeten den Rahmen der Diskussionen. Dabei versuchte der Koordinator mit der Themenvorgabe schon implizit Schnittmengen und Diskussionsgrundlagen zu liefern und somit den Aushandlungsprozess zu steuern. Weitere Beispiele dieser Verfahrensweise sind die intensiven Diskussionen der Arbeitsgruppe (AG) Organische Chemie mit der AG Anorganische Umweltgeochemie, die immer wieder in fruchtbare gemeinsame Methodenergänzungen und Ergebnissen mündeten (siehe Kap. 3.10, 3.11). Zu guter Letzt wurde die Vernetzung innerhalb des Gesamtprojektes kontinuierlich von der Projektleitung forciert und durchgeführt. Auch dieses Buch ist ein Ergebnis dieser Arbeit, bei dem die Projektleitung die Gliederung des Buches vorgab und die Teilprojekte im Rahmen der gemeinsamen Beantwortung der Schlüssfragen zur Zusammenarbeit „gezwungen“ wurden. Außerdem hatte die Projektleitung die Aufgabe, die inhaltliche Vernetzung für Beirats- und Gutachtertreffen für das Gesamtprojekt darzustellen und abzustimmen. Diese Darstellungen wurden durch die Vernetzungsaktivitäten der Teilprojekte unterstützt. Gerade durch die moderierten Diskussionsrunden in den Plena und den Workshops regte die Projektleitung die inhaltliche Vernetzung immer wieder an. Diese Moderation war stark inhaltlich geprägt, denn es wurde immer wieder auf Widersprüche von Einzelergebnissen, Schnittmengen und Inkonsistenzen innerhalb des Gesamtprojektes hingewiesen. Weiterhin wurde von der Projektleitung auf Allgemeinverständlichkeit während der Vorträge oder innerhalb dieses Buches hingewiesen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die verschiedenen angewendeten Verfahrensweisen einen kontinuierlichen Austauschprozess innerhalb der fünf Jahre Projektlaufzeit stimulierten und dass das Thema ‚Vernetzung‘ ein ständiger Begleiter während der Projektlaufzeit war. Weiterhin ist zu konstatieren, dass es einerseits notwendig ist, die Vernetzung von Anfang an zu thematisieren. Andererseits waren viele Mitarbeiter, besonders die Doktoranden, erst nach 1-2 Jahren fachlich in dem eigenen Fachgebiet so „gefestigt“, dass sie auch bereit waren, über den eigenen Tellerrand zu schauen und mit anderen Mitarbeitern inhaltliche inter- und transdisziplinäre Diskussionen zu führen.

[33] Krott (1996, S. 95) spricht von einer idealen Gruppengröße von 12 Personen, um intensive und lange Diskussionen in der Gruppe zu führen.

Als Resultat der Synthesebildung sollten am Ende gemeinsame Produkte stehen, die als Ergebnis der Vernetzung verstanden werden können.

3.12.5 Evaluation der Kommunikationsmittel und -wege

Die Wirksamkeit der im Kapitel 3.12.1 erläuterten Kommunikationswege wurde durch eine Evaluation überprüft. Dazu wurden vorliegende Dokumentationen der Metareflexionsworkshops analysiert, außerdem die im Rahmen des Wissenstransfers durchgeführten Interviews. Zusätzlich wurde die Projektgruppe durch einen Fragebogen mit offenen Fragen aufgefordert, ihre Erfahrungen mit Interdisziplinarität im Projekt und den unterschiedlichen Kommunikationswegen zu schildern. Dabei kam es zu folgenden Ergebnissen:

Das Wiki erwies sich als weniger genutzt, es wurde lediglich von 13% der Antwortenden genannt – und dabei eher kritisch als „nicht so der Renner“ bezeichnet (Projektmitglied 6, August 2013). Im Unterschied dazu wurden Teilprojekttreffen und Treffen zweier oder mehrerer Teilprojekte (Inter-TP-Treffen) von etwas mehr als der Hälfte der Antwortenden (53%) positiv hervorgehoben. Sie wurden vor allem für fachlichen und inhaltlichen Austausch geschätzt oder die Teilprojekttreffen sogar als „entscheidend für den inhaltlichen Fortschritt im Teilprojekt“ (Projektmitglied 8, August 2013) bezeichnet. Die Treffen waren des Weiteren geschätzt für stringentes Arbeiten und dafür, dass sie „stark outputorientiert“ (Projektmitglied 2, August 2013) waren.

Auch die monatlich stattfindenden Plena wurden insgesamt positiv bewertet. Sie wurden dafür geschätzt, dass man dort besonders gut eine Gesamtübersicht über den Projektstand bekomme (66%) und besonders viel über die Arbeit der Kollegen lerne (60%). Dabei wurden besonders die Runden hervorgehoben, in denen jedes Teilprojekt seinen aktuellen Arbeitsstand und Neuigkeiten berichtete. Die Plena halfen auch dabei, die eigene Arbeit in einen größeren Zusammenhang zu setzen (20%), da dort „Fragen nach dem größeren Ganzen“ gestellt wurden (Projektmitglied 6, August 2013), aber auch mit den KollegInnen diskutiert werden konnte, die „die Forschung aus ganz anderen Blickwinkeln sehen und dadurch hilfreiche Hinweise geben“ (Projektmitglied 1, August 2013). Kritisch angemerkt wurde in einem Fall die schwindende Beteiligung an den Plenumssitzungen. Wenn ein großer Teil der Gruppe nicht erscheine und einige Teilprojekte dadurch gar nicht vertreten seien, sei „der gesamte Sinn dieser Treffen gefährdet“ (Projektmitglied 10, August 2013). Als möglicher Grund wurde die lange Dauer der Plena genannt, bei denen nach dem Mittag die Hälfte der Personen fehlte.

Noch kontroverser wurden im Rückblick die Metareflexionsworkshops beurteilt. So waren mit 74% positiven Nennungen die meisten Rückmeldungen positiv. 36% halfen die Workshops, ihre eigene Arbeit in einen größeren Zusammenhang zu setzen und etwas über die Arbeit ihrer KollegInnen zu erfahren. Außerdem wurden die gute Atmosphäre, die Gelegenheit zu informellem Beisammensein und zu ausführlichem Austausch, auch in den Pausen, besonders hervorgehoben. Auch

gab es „viel Anregung für zukünftige Forschungsarbeiten". Die Arbeit wurde, besonders durch die Abgeschiedenheit des Seminarortes, als besonders intensiv erlebt. Auch die höhere Anwesenheitsquote im Vergleich zu den Plena wurde positiv erwähnt.

Methodenkritik gab es in zwei Rückmeldungen (13%) – einmal wurden speziell die zwischengestreuten Auflockerungsmethoden als „Pseudosportübungen" (Projektmitglied 7, August 2013) kritisiert. Eine Kritik fiel etwas aus dem Rahmen, indem sie die Workshops generell unter Ideologieverdacht stellten (Projektmitglied 4, August 2013). In einer weiteren Rückmeldung wurden die Moderatoren kritisiert, die teilweise ihre Rolle verlassen und sich in Ausschweifungen ergangen hätten.

Interessant ist es, für die verschiedenen Arbeitsmethoden jeweils zu schauen, wofür sie geschätzt wurden. Dies sind bei den TP- und Inter-TP-Treffen vor allem Punkte wie inhaltlicher/fachlicher Austausch und stringentes Arbeiten, während die Plenumssitzungen sowohl dafür geschätzt wurden, dass dort ein Gesamtüberblick über den Projektstand und strukturelle Aspekte geschaffen wurde wie auch dafür, dass dort kreative Ideen geschaffen und viel voneinander gelernt wurde. Die Metareflexionsworkshops schließlich animierten zum „über den Tellerrand schauen", dienten der Gruppenintegration und wurden für „Visionen, Weitblick und Vernetzung" geschätzt. Aus diesen Stichworten ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen, der auf unterschiedliche Qualitäten des Arbeitens schließen lässt. Generell scheint es bei diesen Arbeitsformen einen Übergang zu geben vom zielgerichteten und stringenten inhaltlichen Arbeiten der TP- und Inter-TP-Treffen über die teils durch organisatorische Fragen und das gegenseitige „auf dem Stand halten", teils durch Geselligkeit und Kreativität geprägten Plena hin zu den Workshops, die nach diesen Beschreibungen am ehesten dazu animierten, neue Ideen zu entwickeln und im Sinne transformativer Wissenschaft zu systemischem Denken anzuregen.

Anhand der vorliegenden Daten lässt sich nicht abschließend sagen, welche Faktoren der unterschiedlichen Arbeitsformen für diese verschiedenen Wahrnehmungen und Beschreibungen verantwortlich sind. Allerdings lassen sich durchaus einige begründete Rückschlüsse ziehen, denn die unterschiedlichen Arbeitsformen unterscheiden sich in Hinblick auf die zur Verfügung stehende Zeit, die eingesetzten Methoden und auch den Ort erheblich.

Die monatlich stattfindenden Plena waren von Anfang an durch die Projektkoordination moderiert. Dabei wurden im Laufe der Projektlaufzeit sukzessive neue Moderationsmethoden eingeführt, die vor allem aus der Metaplanpraxis kommen: Visualisierung an der Pinnwand, Kartenabfragen und ähnliches. Diese zunehmend verwendeten Methoden wurden in der Abschlussevaluation unterschiedlich bewertet. Teilweise wurden die neuen Kommunikationsmethoden eher als wenig hilfreich bzw. nichts verändernd wahrgenommen, in einem Fall auch harsch kritisiert. Auf der anderen Seite wurden vor allem interdisziplinäre Gruppenarbeiten als sehr positiv bewertet. Auch wurde positiv hervorgehoben, dass die

Zeit effektiv genutzt wurde und schnell Ziele erreicht wurden. Dies steht im Widerspruch zu zwei anderen Rückmeldungen, die eher langwierige Prozesse beklagten. Ebenso wurde hervorgehoben, dass die Methoden die Zusammenarbeit verbesserten.

Die Metareflexionsworkshops schließlich arbeiteten jeweils mit einem breiten Methodenarsenal aus Planungsverfahren, Metaplan und Zukunftswerkstätten, das neben den Prinzipien von Visualisierung und Partizipation auch aus spielerischen und die Phantasie anregenden Methoden bestand. Sie fanden als zweitägige Veranstaltungen abseits des gewohnten Universitätsbetriebes in einem Seminarhaus statt. Die Dokumentationen der Workshops (Projektgruppe BiS Oktober 2009, Projektgruppe BiS Juni 2010, Projektgruppe BiS Oktober 2010, Projektgruppe BiS 2012) zeigen, dass die Ergebnisse derartiger Arbeitsprozesse sehr vielfältig sind und in den allermeisten Fällen über die üblichen „Denkwelten" hinausgehen. Leider liegen von den anderen Arbeitsformen keine vergleichbaren Dokumentationen vor, so dass hier kein systematischer Vergleich gezogen werden kann. Persönliche Erfahrung und kursorische Notizen zeigen aber, dass während der Workshops zumeist eine größere Zahl an Themen aufkam als in den Plena, diese intensiver und weniger fokussiert auf einen vorgefassten Problemzuschnitt diskutiert wurden.

Nach diesen Feststellungen lässt sich vermuten, dass die Arbeitsform, wie sie hier in den Metareflexionsworkshops gewählt war, förderlich für das von transformativer Wissenschaft geforderte systemische Denken ist. Worüber sich hingegen nur – begründet – spekulieren lässt ist die Frage, ob der entscheidende Faktor die verwendeten Methoden sind, die Zeitstruktur einer zweitägigen Blockveranstaltung oder die Abgeschiedenheit eines Seminarhauses.

Es darf allerdings auch nicht verschwiegen werden, dass besonders die Metareflexionsworkshops immer wieder Quelle von Konflikten waren – bis hin zum *Ideologieverdacht*. Dies mag an verschiedenen Gründen liegen. Zum einen waren es sicher die ungewohnten Methoden in Kombination mit der langen und intensiven Zeitnutzung einer derartigen Veranstaltung, die nicht in die gewohnten Arbeitsabläufe und Terminpläne hineinpasst. Auch sind gerade Elemente der Muße, der Phantasieanregung und des Spielerischem – die ja dem Öffnen des Blickes dienen sollen – erst einmal sehr ungewohnt.

In einer der Rückmeldungen der Abschlussevaluation wurde dazu geschrieben: *„Die Bereitschaft zur kreativen Muße war zu gering (wohl oft als unbefriedigende Zeitverschwendung empfunden). Gerade aber das sich Zeitlassen für das Entstehen neuer gemeinsamer Gedanken kam oft zu kurz. In diesem Kontext waren viele Professoren meist kein Vorbild für die Mitarbeiter (eher umgekehrt)."* (Projektmitglied 13, November 2013).

In Bezug auf einen Metareflexionsworkshop wurde außerdem geäußert: *„Blockaden bei einem kleinen Teil der Beteiligten wirkten sich beim 1. und 2. Treffen sehr ungut auf die gerade sich findende Gruppe aus, was ich enorm störend fand. Hier ging sehr viel Energie verloren und einfach mal einen neuen Stil des Zusammenkommens und der Kooperation zu wagen, war stark gehandikapt durch Ungeduld."* (Projektmitglied 13, November 2013)

Dieses Zeit-Methodenproblem tauchte nicht nur im Zusammenhang mit den Metareflexionsworkshops auf, sondern auch bei den Plena.

In den anfänglichen Plenumssitzungen gab es zudem immer wieder Konflikte über Methoden und Inhalte, die teils direkt ausgetragen wurden, teils auch durch demonstratives Desinteresse (in Form von konzentriertem Arbeiten am Laptop während ganzer Sitzungen) oder durch Fernbleiben der Sitzungen geäußert wurden: *„Ein großes Handikap war, dass die Professoren eher ausnahmsweise bei den Treffen waren und wenn sie anwesend waren, teilweise noch andere Aufgaben erledigten (ein Internetverbot wäre wohl adäquat gewesen).*“ (Projektmitglied 13, November 2013) Vermutlich lassen sich diese Beobachtungen ähnlich erklären, wie dies auch schon bei Loibl (2005, S. 16) geschildert wird. Da sich die Konflikte aber immer wieder speziell um die Punkte „Wissenschaftsverständnis“ oder „Nachhaltigkeitsdefinition“ entzündeten liegt es nahe, hier Differenzen bezüglich unterschiedlicher zugrundeliegenden Werte und Ziele des Projektes zu sehen, die anhand anderer Anlässe immer wieder aufbrachen und sich an Differenzen zwischen einzelnen Projektmitgliedern verfestigten.

Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Projektgruppen und Empfehlungen

Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen sollte jede Projektgruppe ermutigt werden, mit einer Vielfalt unterschiedlicher Kommunikationswege zu arbeiten, da diese sehr unterschiedliche Funktionen für die Projektmitglieder erfüllen können. Dies gilt für die Form der Treffen, aber ebenso für Moderations- und Kommunkationsmethoden innerhalb der Sitzungen. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die Integration der Projektgruppe und die Entwicklung gemeinsamer interdisziplinärer Visionen, Sprache und Leitideen durch Arbeitsformen wie der Metareflexionsworkshops begünstigt werden, während gleichzeitig eher stringente Arbeitsformen wie die Teilprojekttreffen für die konkrete inhaltliche Arbeit notwendig sind.

Literatur

Defila, R., DiGiulio, A. & Scheuermann, M. (2006). *Forschungsverbundmanagement. Handbuch für die Gestaltung inter- und transdisziplinärer Projekte.* VDF Hochschulverlag. Zürich.

IZNE (Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung) (2013). *Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Bioenergienutzung – Intrumente zur Entscheidungsunterstützung.* IZNE. Georg-August-Universität Göttingen. 15 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.bioenergie.uni-goettingen.de/fileadmin/user_upload/Veroeffentlichungen/BioenergieBroschuere_2013_lowres.pdf

Krott, M. (1996). Interdisziplinarität im Netz der Disziplinen. In: Balsiger, Ph. W., Defila, R., Die Giulio, A. (Hrsg). *Ökologie und Interdisziplinarität – eine Beziehung mit Zukunft?* S. 87 – 97. Basel: Birkhäuser.

Loibl, M. C. (2005). *Spannungen in Forschungsteams. Hintergründe und Methoden zum konstruktiven Abbau von Konflikten in inter- und transdisziplinären Projekten.* Univ. Diss., 209 S., Carl-Auer-Verlag.

Loibl, M. C. (2004). Steuerung inter- und transdisziplinärer Forschung. Göttingen, 1. Aufl. Heidelberg: Carl-Auer Verlag; Carl-Auer-Systeme.

Projektgruppe BiS (2009). Protokolle Plena 2009 „Bioenergie im Spannungsfeld".

Projektgruppe BiS (Oktober 2009). Bioenergie im Spannungsfeld. Dokumentation Workshop 26.-27.10.2009.

Projektgruppe BiS (Juni 2010). Bioenergie im Spannungsfeld. Dokumentation Workshop 28.06.-29.06.2010.

Projektgruppe BiS (Oktober 2010). Bioenergie im Spannungsfeld. Workshop Folgeantrag Dokumentation. 04.10.-05.10.2010.

Projektgruppe BiS (2012). Bioenergie im Spannungsfeld. Dokumentation Workshop 10.2012.

Projektmitglied 1 (August 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, W. 13.08.2013.

Projektmitglied 10 (August 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 28.08.2013.

Projektmitglied 11 (September 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 01.09.2013.

Projektmitglied 13 (November 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 20.11.2013.

Projektmitglied 14 (Dezember 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 01.12.2013.

Projektmitglied 15 (August 2012). Interview geführt von Girschner, Wiebke/Kannwischer, Claus. 23.08.2012.

Projektmitglied 2 (August 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 13.08.2013.

Projektmitglied 4 (August 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 19.08.2013.

Projektmitglied 6 (August 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 20.08.2013.

Projektmitglied 7 (August 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 26.08.2013.

Projektmitglied 8 (August 2013). Fragebogen verfasst von Girschner, Wiebke. 26.08.2013.

Schneidewind, U., Singer-Brodowski, M. (2013). *Transformative Wissenschaft Klimawandel im deutschen Wissenschafts- und Hochschulsystem*. Metropolis. Marburg

4 Nicht nur Masse, sondern auch Klasse – Synthese der Ergebnisse

4.1 Steuerung einer nachhaltigen Produktion und energetischen Nutzung von Biomasse auf lokaler und regionaler Ebene

Jens Ibendorf

4.1.1 Kriterien der Analyse

Umweltprobleme durch Energiepflanzenanbau sind immer im Kontext der übrigen Landnutzung zu sehen – die Wirkung der Energiepflanzen ist also nur schwer zu isolieren. Veränderungen durch diesen Komplex von Einflüssen zeigen sich *regional bzw. flächendeckend* in einer allgemeinen Verschlechterung der Ökosystemleistungskapazitäten durch viele, summativ wirkende Nutzungseinflüsse. In der jüngeren Vergangenheit wurden solche Veränderungen insbesondere durch die Verengung der Fruchtfolgen, das Stickstoff- und Pflanzenschutzmittel (PSM)-Management sowie die generelle Abnahme von Grünland hervorgerufen. Die zugrundeliegenden Ursachen sind Marktimpulse insbesondere durch das EEG, aber auch durch die globalen Agrarmärkte, die auf alle Erzeuger wirken und die Stärke des Nutzungseinflusses im Ökosystem bestimmen. Die Wahl der angebauten Energiepflanzen oder anderer Kulturarten sowie der Umfang des jeweiligen Anbaus hängen entscheidend von diesen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Andererseits treten bestimmte Probleme nur auf *spezifischen Flächen* auf, die besonders wertvoll sind und empfindlich auf bestimmte Nutzungseinflüsse reagieren. Beispiele hierfür sind der Verlust von altem Grünland und Mooren mit hohem Wert für den Klima- und Biotopschutz oder Schadstoffeinträge in Gebiete mit einem besonders bedeutenden Grundwasserkörper.

Sowohl zur flächenunspezifischen Steuerung der Verursachereinflüsse als auch für die flächenspezifischen Wirkungen auf die betroffenen Ökosystemleistungen sollten Steuerungsoptionen vorhanden sein und auch eingesetzt werden. Dabei ist zwischen Marktbeeinflussung und restriktiv wirkenden Rechtsinstrumenten zu unterscheiden, die wie kommunizierende Röhren miteinander in Beziehung gesetzt werden müssen. Vereinfacht gesagt: Je stärker die Marktimpulse sind, die Umweltprobleme hervorrufen können, umso mehr besteht i.d.R. der Bedarf zur Gegensteuerung mit rechtlichen Mitteln.

Ob entsprechende Steuerungsoptionen geschaffen und vollzogen werden, hängt auch davon ab, ob das politische Mehrebenensystem funktioniert oder ob Dissonanzen existieren. Letztere entstehen daraus, dass die verantwortliche politische Ebene nicht tätig wird oder werden kann (s. Kap. 3.7). Verantwortlich ist theoretisch immer die Ebene, die das von Umweltwirkungen bzw. Wohlfahrtsverlusten betroffene Gebiet und damit den betroffenen Ausschnitt der Gesellschaft repräsentiert. Generell gilt dabei selbstverständlich auf allen Ebenen das Prinzip der Abwägung der unterschiedlichen raumwirksamen Belange im Rahmen der von den höheren Ebenen vorgegebenen rechtlichen Grenzen. Diese definieren auch die gesellschaftlichen Ansprüche an privates Eigentum. Das Subsidiaritätsprinzip betont darüber hinaus, dass zunächst die Kapazitäten der unteren, problemnahen Ebenen ausgeschöpft werden sollten, bevor eine Steuerung von höheren Ebenen erfolgt. So können die höheren politischen Ebenen nur begrenzt eine flächenspezifische Steuerung implementieren. Im Sinne einer Selbstregulation funktioniert das Subsidiaritätsprinzip auf der unteren Ebene allerdings im Wesentlichen im Rahmen gleichlaufender ökonomischer Interessen. Entsprechend ist es Aufgabe der höheren Ebenen (EU, Bund, Land), die Treiber von Fehlentwicklungen zu regulieren und die rechtlichen Voraussetzungen für einen regions- und flächenangepassten, optimierten Anbau von Energiepflanzen zu schaffen, der dann von den unteren Entscheidungsebenen implementiert werden kann. Durch die von überregionalen Ebenen gesetzten Marktimpulse und durch flächendeckend wirkendes Recht werden in einem Marktraum für die Erzeuger weitgehend gleiche Rahmenbedingungen geschaffen (eingeschränkt nur durch die Situationsgebundenheit des Eigentums). Damit wird z.B. einem Ökodumping vorgebeugt. Es muss aber auch beachtet werden, dass mit dem flächendeckend wirkenden Recht nur solche Umweltprobleme effizient gelöst werden können, die überall bzw. summativ im Raum wirksam sind.

Die verfügbaren Steuerungsinstrumente spiegeln die oben angesprochenen Umweltproblemkonstellationen wider: Sie wirken entweder flächendeckend und unspezifisch oder flächen- und problemspezifisch. In beiden Fällen können Impulse über Regulation, Anreiz und Kommunikation gesetzt werden.

4.1.2 Flächendeckend wirkende Instrumente

4.1.2.1 Flächendeckend wirkende Tendenzsteuerung über Eingriffe in den Markt

Instrumente der (flächendeckend auf die Akteure wirkendenden) Tendenzsteuerung nehmen in der Regel auf Märkte und damit auf Preise oder Kosten Einfluss. Auch die Schaffung einer staatlichen Nachfrage nach bestimmten Produkten oder Leistungen kann als Marktimpuls aufgefasst werden. Diese Faktoren bestimmen das betriebswirtschaftliche Handeln der einzelnen Landwirte und damit wesentlich die Allokation des Energiepflanzenanbaus auf einem Betrieb und in einer Region.

Eingriffe in diese Treiber sind sehr wirksam für die Steuerung einer allgemeinen Tendenz der Verursachereinflüsse. Sie wirken aber auch sehr unspezifisch im Raum, nehmen keine Rücksicht auf Empfindlichkeiten bestimmter Ökosysteme und können starke Kollateralschäden im Sinne nicht gewollter Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft hervorrufen. Diese Art von Steuerung wird auf den nationalen und europäischen Entscheidungsebenen vorgenommen und zwar nicht zuletzt deshalb, weil im europäischen oder nationalen Wirtschaftsraum unter vergleichbaren Rahmenbedingungen produziert werden soll. Diese Instrumente können z.B. Anreize über die Beeinflussung von Preisen setzen, Produktionsfaktoren wie Düngemittel verteuern oder die Bodenpreise beeinflussen (im Falle der Direktzahlungen der GAP). Häufig bedürfen solche pauschalen Maßnahmen einer Flankierung, um ungewollte Nebenwirkungen zu vermeiden.

Das wichtigste Marktinstrument für den Energiepflanzenanbau ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG der Jahre 2000 bis 2017), das in früheren Jahren vor allem als Treiber für den Maisanbau wirkte. Durch finanzielle Marktanreize hat es den Anbau von Energiepflanzen entscheidend befördert. Wie für ein solches Tendenzsteuerungsinstrument typisch und weil es nicht mit Ausbauzielen direkt verbunden wurde, kann das EEG weder zielgenau steuern, wie viel Bioenergie tatsächlich produziert wird, noch sorgt es dafür, dass flächenspezifische Kollateralschäden vermieden werden. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der Experteninterviews (siehe Kap. 3.5.4.2), in denen sich ein Befragter überzeugt zeigte, dass das EEG entscheidend für den ausbleibenden Erfolg oder gar die Umsetzung von regulierenden Maßnahmen mitverantwortlich ist. Er begründet dies vor allem mit der fehlenden regionalen Differenzierung des EEG (u.a. Fördermittelprogrammen und gesetzlichen Regelungen). So habe vor allem der Güllebonus des EEG nur dazu geführt, dass in Viehhaltungsregionen, die ohnehin schon einen relativ hohen Maisanteil zu verzeichnen hatten, der weitere Biogasanlagenbau und somit die Maisproblematik forciert wurde. Sowohl für die Umsetzungsbereitschaft bei Landwirten als auch für den ökologischen Maßnahmenerfolg ist es daher dringend notwendig, die Förderung und Ausgestaltung von Schutzmaßnahmen regional anzupassen. Programme wie MANUELA zielen darauf ab, eine standortspezifizierte Maßnahmenumsetzung/-förderung zu unterstützen. Sie können, indem bspw. Biotopentwicklungspotenziale kartographisch auf der Betriebsebene dargestellt werden, dem Landwirt zeigen, an welcher Stelle z.B. die Anlage eines Ackerrandstreifens eine besonders schutzwürdige, seltene Ackerwildkrautflora und nicht nur Generalisten hervorbringen kann.

Eine Nachsteuerung zur Sanierung bereits eingetretener Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft ist mit dem gegenwärtigen EEG nicht zu erwarten. Im Gegenteil, das EEG behindert eine Nachsteuerung geradezu. Die Einspeisevergütung gewährte das EEG aus Gründen der Investitionssicherheit einer genehmigten Anlage für garantierte zwanzig Jahre. Dies gilt auch für Bonuszahlungen für bestimmte Leistungen, wie z. B. den Einsatz nachwachsender Rohstoffe oder den Betrieb einer Biogasanlage in gleichzeitiger Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-

Bonus). Jede Umsteuerung durch eine spätere Fassung des EEG wirkt nur für Neuanlagen. Auch die mit dem EEG 2009-2017 versuchte Verstärkung der Wärmenutzung bei Biogasanlagen sowie der Möglichkeit der Einspeisung in Gasnetze und damit der Entkopplung von Gas- und Stromerzeugung erreicht die bereits laufenden Anlagen mit sehr großer zeitlicher Verzögerung oder gar nicht. Doch selbst die bereits implementierten bisherigen Umsteuerungsversuche im EEG erscheinen noch unzureichend. Insbesondere die Anreize für eine effektive Nutzung der bei der Stromerzeugung produzierten Wärme durch die Verbrennung von Biogas und sonstiger Biomasse genügen nicht. Keinerlei Steuerungsfunktion entfaltet das EEG in Bezug auf die Platzierung von Neuanlagen sowie die räumliche Steuerung der Intensität und der Verteilung des Energiepflanzenanbaus in Abhängigkeit von Vorbelastungen und Umweltempfindlichkeiten (von Haaren et al. 2013).

Ebenfalls zu den ökonomischen Anreizinstrumenten gehören die flächenunspezifisch angebotenen Agrarumweltmaßnahmen nach der ELER-VO (ELER = Europäischer Landwirtschaftsfond für die Entwicklung des ländlichen Raums; Dickel et al. 2010). Sie sind flächendeckend verfügbar, ihr Budget und die Ausgleichzahlungen für die Maßnahmen reichen aber nicht für eine flächendeckende Inanspruchnahme durch die Landwirte aus. Da die Teilnahme freiwillig ist, werden die Maßnahmen im Raum zufällig verteilt von den Landwirten wahrgenommen mit einem Schwerpunkt auf solchen Flächen, wo die Erbringung der erwünschten Leistung für den Landwirt besonders geringe Bewirtschaftungsumstellungen verursacht (z.B. Gay et al. 2004). Unter diesen Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass sie unspezifische, aber merkliche, summative Umweltentlastungen bewirken sollen. In Niedersachsen werden solche Maßnahmen vor allem im Rahmen von Agrarumweltmaßnahmen (AUM) durch das Landwirtschaftsministerium angeboten. Angesichts der Entwicklungen in stärker von Veränderungen der Fruchtartendiversität und -verteilung, Erhöhung der Stickstoffausträge oder von Grünlandumbruch betroffenen Landkreisen in Niedersachsen haben diese Instrumente es aber offenbar nicht vermocht, solche allgemeinen Entwicklungen zu verhindern. Dies ist nicht verwunderlich, da die Landesebene auf die Impulse des EEG nicht mit einer entsprechenden Erhöhung des Budgets für solche Maßnahmen geantwortet hat. Im Gegenteil: Die Finanzansätze sind 2006 sogar zurückgegangen.

Dennoch konnte in der Evaluation der AUM (Dickel et al. 2010) gezeigt werden, dass insbesondere im Bereich des Wasserschutzes bis 2010 noch ein merklicher Effekt eingetreten ist. Die Autoren kommen allerdings auch zu der Schlussfolgerung, dass „die Wasserschutzwirkungen (…) stärker auf den Bedarf ausgerichtet werden [sollten], der in den Maßnahmenplänen gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) für Grund- und Oberflächengewässer umrissen wird“ (ebd.). Dazu sei erforderlich, das komplette Förderangebot unter das Dach eines gemeinsamen strategischen Ansatzes (unter Beteiligung von Landwirtschaftsministerium und Umweltministerium) zu stellen. Diese Strategie müsse regional differenziert

aufzeigen, welche Teilmaßnahmen in welchem Umfang zur Verbesserung bestehender Belastungen bei Grund- und Oberflächengewässern beitragen sollen. Durch Anpassungen der Maßnahmen ist bereits zwischen 2006 und 2009 aufgrund des Anstieges wirksamer Förderflächen der Wirkungsbeitrag deutlich angewachsen (ebd.). In den letzten Jahren scheint dieser Effekt allerdings wieder zurückzugehen.

Insgesamt wird der Marktanreiz durch das EEG in der derzeitigen Situation zwar durch die richtige Steuerungsebene gesetzt, es wurde jedoch bei der Einführung des EEG versäumt zu prüfen, ob die unteren Handlungsebenen zu einer flankierenden Nachsteuerung des starken Marktimpulses instrumentell oder von ihren Interessen her in der Lage sind. Eine Reaktion von Bund und Land im Bereich der Anreizinstrumente hätte z.B. die Erhöhung des Budgets für Agrarumweltmaßnahmen zur Fruchtfolgediversifizierung sowie Stickstoffreduzierung sein können; eine andere Reaktion wäre die Einführung von Abgaben auf einen erhöhten Stickstoffeinsatz. Diese Maßnahmen hätten sowohl Energiepflanzenanbauer als auch andere Landwirte gleichermaßen betroffen. Es ist allerdings anzuzweifeln, ob die Erhöhung des Budgets flächenunspezifisch angebotener AUM tatsächlich ein effizientes Mittel gewesen wäre, da in starkem Maße Mitnahmeeffekte hervorgerufen bzw. viele Maßnahmen auf wenig empfindlichen Flächen mit geringem Handlungsbedarf durchgeführt werden. So wäre es nicht effizient, Ausgleichszahlungen für Düngebeschränkungen zum Schutz empfindlicher Grundwasserkörper auch in nicht austragsgefährdeten Gebieten anzubieten. Ebenfalls effizienzmindernd dürfte sich auswirken, dass es bei den flächendeckend angebotenen AUM derzeit keine Möglichkeit gibt, flächeneffektive und kostenmindernde Synergieeffekte durch multifunktionale Maßnahmen gezielt herbeizuführen (Galler et al. 2015).

4.1.2.2 Flächendeckend wirksame rechtliche Regulierung der Nutzungseinflüsse

Ebenfalls flächendeckend wirken Rechtsinstrumente, die für alle Erzeuger und überall gleiche Verursacherpflichten definieren. Diese rechtlichen Festsetzungen bestimmten das Mindestniveau der Rücksichtnahme auf andere Ökosystemleistungen und konkretisieren die Sozialpflichtigkeit des Eigentums, da sie unentgeltlich eingehalten werden müssen. Die EU-, Bundes- und ggf. die Landesebene sind die geeigneten Steuerungsebenen, um solche Instrumente einzuführen, da sie als Rahmenbedingung für alle Landwirte wirken. Die Vorschriften der guten fachlichen Praxis im deutschen Umwelt- und Landwirtschaftsrecht sowie die auf EU-Umweltrecht zurückführbaren Cross-Compliance(CC)-Regelungen der gemeinsamen Agrarpolitik der EU fallen in diese Instrumentenkategorie. Die über das derzeit geltende Recht hinausgehenden CC-Regelungen, wie z.B. das Verbot, Landschaftselemente einer bestimmten Größe zu beseitigen, fallen theoretisch in die Kategorie der Marktinstrumente, weil sie an die Direktzahlungen gekoppelt sind und nicht eingehalten werden müssen, wenn keine Direktzahlungen fließen. In der Praxis wirken sie aber ähnlich wie die Regelungen der guten fachlichen Praxis

(gfP), da nahezu jeder Landwirt Direktzahlungen erhält. Solche flächendeckend wirkenden Instrumente haben den Vorteil, dass sie für die öffentliche Hand lediglich Kontrollkosten verursachen. Sie wirken direkt auf den Verursacher von unerwünschten Umweltwirkungen und setzen damit an der Quelle und am Verursacherprinzip an. Auf der Betriebsebene sind viele Maßnahmen überdies praktisch und von der Verantwortungszuweisung her am besten umsetzbar. In der Vergangenheit allerdings haben es die existierenden Rechtsvorschriften der gfP und CC nicht vermocht, die Entwicklung in Bezug auf Fruchtfolge und Grünlanderhaltung wirksam zu beeinflussen. Dazu waren die Vorschriften nicht ausreichend konkret gefasst. Die Spielräume auf Landesebenen, z.B. Maßnahmen nach Überschreitung der 5 %-Grenze beim Grünlandumbruch auszugestalten, wurden erst mit Verspätung genutzt. Auch können Defizite im Bereich des Vollzuges eine Rolle gespielt haben. Da die unerwünschten Folgen (oder externen Kosten) des Energiepflanzenanbaus nicht auf der Betriebsebene anfielen, sondern regionale Erholungssuchende, die Trinkwasserversorgung, Biodiversität oder künftige Generationen betrafen, gab es für die Landwirte i.d.R. keinen Anreiz, die Regeln einzuhalten, was wiederum den Kontroll- oder Beratungsbedarf durch die höheren Ebenen erhöht.

4.1.2.3 Flächendeckend eingesetzte Kommunikationsinstrumente

Weitestgehend ungenutzt blieben Potenziale, die Landwirte bei freiwilligen Leistungen unterstützten. Dass Einzelne durchaus bereit sind, über gesetzliche Umweltstandards hinauszugehen, zeigen die Beispiele aus den Untersuchungen der Betriebsebene (Kap. 3.5.4.1). Es gibt aber kaum Instrumente, die an den Motiven der Landwirte ansetzen und deren eigenem Gestaltungswillen entgegenkommen. So steckt die Bereitstellung von Umweltinformationen für die selbstverantwortliche Diagnose sowie die Maßnahmengestaltung durch die Landwirte ebenso wie die Unterstützung der Umweltöffentlichkeitsarbeit noch in den Kinderschuhen. Zwar gibt es eine ELER-Förderung der Umweltberatung; sie ist jedoch bisher in Niedersachsen nur in sehr geringem Umfang implementiert. Eine Unterstützung der Bereitschaft zur Umsetzung jagdlicher Maßnahmen ist in Ansätzen vorhanden, jedoch mangelt es noch daran, die Maßnahmen auch multifunktional für einen breiteren Naturschutz auszurichten. Hervorzuheben ist allerdings die positive Rolle, die einige Biogasanlagenbetreiber(-gemeinschaften) – als nicht staatliche Akteure – gespielt haben, indem sie ihre Zulieferer dazu ermutigt haben, Blühstreifen zur Förderung der lokalen Akzeptanz einzurichten.

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass die flächenunspezifisch wirkenden Rechts- und Kommunikationsinstrumente zwar unbestreitbare Vorteile in Bezug auf die Schonung des öffentlichen Budgets haben. Berücksichtigt man allerdings auch die privat anfallenden Kosten, so können sie ebenfalls ineffizient sein. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn statt des flächendeckenden Einflusses nur eine Wirkung auf spezifischen Flächen notwendig ist. Es wäre also nicht sinnvoll, alle Landwirte mit strengen Auflagen einzuschränken, die der Schutz des Na-

turhaushaltes nur in bestimmten, besonders schutzwürdigen oder empfindlichen Gebieten erfordert. In einem solchen Fall würde man mit instrumentellen Kanonen auf Spatzen schießen.

4.1.3 Flächenspezifisch wirkende Instrumente

Für flächenspezifisch anzugehende Handlungsfelder existieren bereits Instrumente, die es ermöglichen, Impulse in Gebieten mit besonderem Handlungsbedarf zu setzen. Es handelt sich im Bereich der Anreizinstrumente um solche Maßnahmen aus dem ELER-Fonds, die flächenspezifisch eingesetzt werden können (Gebietskulisse). Im Bereich der Rechtsinstrumente ist vor allem die Möglichkeit der Schutzgebietsausweisung relevant. Ferner sind hier die räumliche Planung und das Baurecht zu nennen, die theoretisch eine Steuerungswirkung auf den Biogasanlagenbau und damit indirekt einen Einfluss auf die räumliche Allokation des Energiepflanzenanbaus ausüben könnten.

Grundsätzlich werden auch die flächenspezifisch wirkenden Instrumente von den höheren Entscheidungsebenen bereitgestellt. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass es gerade bei dem flächenspezifischen Handlungsbedarf um Schutzgüter geht, die für große Kollektive der Bevölkerung oder für künftige Generationen bedeutsam sein können und die keine Fürsprecher auf der lokalen Ebene oder der Betriebsebene haben, wenn diese zwar das Naturgut möglicherweise im Überfluss besitzt aber nicht von seinem Schutz profitiert (z.B. Treibhausgasspeicher, derzeit ungenutzte Trinkwasserressourcen, lokal verbreitete, aber überlokal seltene Arten). Nicht selten nutzt der Verbrauch eines Naturgutes sogar der betrieblichen oder lokalen Ebene (z.B. Steuereinnahmen durch eine Biogasanlage); die Umweltkosten müssen aber auf höheren Ebenen getragen werden (Rückgang von Arten durch indirekte Wirkungen der Anlage wie Grünlandverlust). Bei der Ausgestaltung der räumlichen Steuerung sollten allerdings die unteren Entscheidungsebenen einbezogen werden, die über das beste räumliche Wissen und die Kenntnis der Akteure verfügen.

4.1.3.1 Flächenspezifisch wirkende Anreizinstrumente

Anreizinstrumente haben das Potenzial, Landwirte auf empfindlichen und wertvollen Standorten zu einem umweltschonenden oder gar -fördernden Anbau bzgl. Fruchtartenwahl und zusätzlichen Maßnahmen wie Ansaaten mit regionalem Saatgut zu bewegen. In den allermeisten Bundesländern wird jedoch – trotz Verbesserungen in der letzten Förderperiode – noch immer ein großer Teil der Agrarumweltmaßnahmen entweder ungezielt auf allen Flächen oder mit nicht ausreichend differenzierten Gebietskulissen angeboten, so dass der Steuerungseffekt verschenkt wird (vgl. Dickel et al. 2010). In Niedersachen werden lediglich die anspruchsvolleren Maßnahmen des mit einem viel zu geringen Budget ausgestatteten Vertragsnaturschutzes und in Ansätzen Wasserschutzmaßnahmen mit Flächenkulissen ange-

boten. Beide Maßnahmen waren bisher in Niedersachsen jedoch nicht so ausgestattet, dass sie den flächenmäßig erheblichen Steuerungsbedarf allein im Bereich des gezielten Grünlandschutzes abdecken konnten (s. Albert et al. 2008, 2009). Um die breite Flächenwirkung der Wasserschutzmaßnahmen steht es laut Evaluationsbericht besser. Die Maßnahmen sind stark darauf abgestellt, die Ziele der WRRL zu erreichen. Sie sind zudem auf bestimmte Situationstypen beschränkt, jedoch überwiegend ohne flächenspezifische Kulisse: Die NAU/BAU-Maßnahmen (Code 214-A) mit Wasserschutzziel dienen dem Oberflächengewässerschutz, und zwar u.a. der Vermeidung von Bodenerosion sowie von Oberflächenabfluss und Nährstoffaustrag in Gewässern. Mulch- oder Direktsaat oder Mulchpflanzverfahren (MDM-Verfahren) werden auf besonders erosionsgefährdeten Flächen angeboten. Die Anlage permanenter Blühstreifen (A6) ist durch Bindung an Gewässerläufe sehr spezifisch auf den Schutz von Oberflächengewässern ausgerichtet. Über die Anwendung von umweltgerechten Gülleausbringungstechniken und über den Anbau von Zwischenfrüchten/Untersaaten soll der Schutz des Grundwassers erreicht werden. Die zuletzt genannte Teilmaßnahme war im Erstbeantragungsjahr 2009 an eine Gewässerschutzkulisse gebunden, die durch Gebiete mit erhöhtem Nitratgehalt im Grundwasser gebildet wurde und der Zielkulisse der WRRL entspricht. Die Beschränkung auf die Zielkulisse wurde ab dem Antragsjahr 2010 wieder aufgehoben. Ab 2010 sollte die neu eingeführte, klimaschonende Grünlandbewirtschaftung durch Vermeidung von tief wendender Bodenbearbeitung zur Grünlanderneuerung auch dem Wasserschutz dienen. Zusammen sollte über die NAU/BAU-Maßnahmen mit Wasserschutzziel eine Fläche von rund 250.000 ha erreicht werden. (Dickel et al. 2010, S. 77 – 80). Ob dies erreicht wurde, ist ungewiss, jedoch deuten die Anstiege der Nitrat-Gehalte in Wasserschutzgebieten darauf hin, dass möglicherweise gerade auf besonders gefährdeten Flächen kein Erfolg erzielt wurde. Die Maßnahmen sind freiwillig und die Prämien vor dem Hintergrund der derzeit in der Agrarproduktion erzielbaren Deckungsbeiträge finanziell gerade in den Gebieten mit hohem Handlungsbedarf nicht attraktiv (Knispel & Rode 2010). Die Budgetzuweisungen für diese Programme werden auf Landesebene bestimmt; das stellt nicht unbedingt sicher, dass die bundes- und europaweite Bedeutung der Schutzgüter ausreichend berücksichtigt wird, obwohl die EU-Ebene durch eine Kofinanzierung der Maßnahmen finanziell am Gesamtbudget beteiligt ist. Auch die Gebietskulissen werden auf der Landesebene vorgegeben. Das ist im Prinzip für den landesweiten Arten- und Biotopschutz oder für den Gewässerschutz die geeignete Ebene. Die Belange des europäischen Arten- und Biotopschutzes sind gesichert, da die wichtigen Gebiete durch das Netz Natura 2000 vorgegeben sind. Der bundesweite Biotopverbund ist bisher aber lediglich informell flächenhaft konkretisiert (Fuchs et al. 2011) und wurde nicht bei den Gebietskulissen berücksichtigt. Man kann hier also von einer fachlichen Lücke des Naturschutzes im Bereich der räumlichen Steuerung sprechen. Außerdem wurden die Kulisse und die Maßnahmen für die landesweit bedeutsamen Schutzgüter nicht differenziert, sodass lokale Bedingungen nicht mit einbezogen wurden. Ebenso wenig wurde für

die regional und lokal bedeutsamen Schutzgüter eine Ergänzung der Kulisse vorgenommen. Hier gäbe es zwar die Landschaftsplanung, auf deren Basis die Gebietskulissen und flächenbezogene Ziele differenzierter darstellbar wären. Die Landschaftsplanung wird aber (entgegen den Zielen des Bundesnaturschutzgesetzes) in Niedersachsen nicht regelhaft für diese Aufgabe genutzt. Eine zielgerechte Differenzierung der Prämien z.B. durch erfolgsorientierte Honorierung ist in Niedersachsen nur in sehr kleinem Maßstab ausgestaltet. Gar nicht weiterverfolgt wurden Auktionsmodelle (s. Freese et al. 2011; Ulber et al. 2011; von Haaren & Bathke 2007). Beide Ansätze würden ebenfalls eine flächenkonkrete Priorisierung voraussetzen.

4.1.3.2 Schutzgebietsausweisungen

Auch die hoheitlichen Instrumente einer flächenspezifischen Steuerung werden von der Bundes- oder Landesebene bereitgestellt. Das entscheidende Instrument sind hier die Schutzgebietsausweisungen. Für den Europäischen Arten- und Biotopschutz ist dabei der Entscheidungsspielraum der implementierenden Ebene in besonderem Maße eingeschränkt worden. In Natura-2000-Gebieten müssen Veränderungen, die den Schutzzweck in Frage stellen, verhindert werden. Dennoch waren auch solche Gebiete in den vergangenen Jahren durch unerwünschte Veränderungen der Landnutzung betroffen. Für die übrigen schutzwürdigen Gebiete gilt, dass viele Konflikte zwischen Energiepflanzenanbau und Naturschutz nicht mit dem Instrument des Schutzgebietes verhindert werden konnten, weil nur die wertvollsten Ressourcen durch wirksame Schutzgebietsausweisungen geschützt sind. So können nur Wasser- und Naturschutzgebiete mit Geboten in die Flächennutzung der Landwirtschaft eingreifen. Hinzu kommt, dass viele Schutzgebietsverordnungen die Steuerungsoptionen bezogen auf den Energiepflanzenanbau nicht ausgeschöpft haben und unzureichend für die Herausforderungen gerüstet sind (Buhr et al. 2010, 2013). In vier betrachteten niedersächsischen Landkreisen waren in 7 von 31 Wasserschutzgebieten (WSG) weder die Bodenbedeckung noch die Bewirtschaftung geregelt. Die bedarfsgerechte Ausbringung der Gärreste war nur in 2 von 31 WSG ausreichend geordnet. Lediglich eine von 54 Landschaftsschutzgebiets-Verordnungen steuerte die Kulturartendichte, -verteilung und die Zulässigkeit hochwachsender Kulturen zumindest teilweise (ebd.). Die Ausweisung zusätzlicher und die Ausgestaltung von bestehenden oder geplanten Schutzgebieten wurden auch durch die Regionalplanung weder vorbereitet noch angeregt. In der Region Hannover wird allerdings immerhin das in Landschaftsschutzgebieten liegende Grünland geschützt.

Grund für die zurückhaltende Nutzung des hoheitlichen Instrumentariums kann die Kompetenzverteilung in Niedersachsen sein. Nach Abschaffung der Bezirksregierungen besteht ein theoretisch ungünstiges Übergewicht der Kompetenzverteilung auf der kommunalen Ebene. Diese ist an einer Schutzgebietsausweisung für die Sicherung überregionaler Interessen ggf. weniger interessiert und zudem

verstärkt dem Druck von Akteuren ausgesetzt, die Kosten übernehmen sollen (Landwirte). Die Situation in der Region Hannover zeigt entsprechend deutlich, dass die Schutzgebiete, die eine Reglung der Landnutzung erlauben, bei weitem nicht den theoretischen Bedarf abdecken, wenn dieses Instrument allein die Flankierung der Bioenergieentwicklung übernehmen soll (Albert et al. 2014, 2016).

Allerdings ist sehr umstritten, inwiefern die Schutzgebietsausweisungen tatsächlich vornehmlich den flächenspezifischen Regelungsbedarf abdecken sollten. Zwar trifft für sie der bereits für die gfP genannte Vorzug zu, dass nur geringe öffentliche Mittel beansprucht werden. Auch sind die hohe Steuerungsgenauigkeit und die Allgemeinverbindlichkeit der Auflagen vorteilhaft. Nachteilig ist allerdings, dass die Akzeptanz der Landnutzer gering ist und sich in der Folge eine geringe Bereitschaft zur Schutzgebietsausweisung der regionalen und lokalen Entscheidungsebenen mit einem hohen Zeitaufwand für die Ausweisung und Kontrolle paart. Dieser Aufwand kann derzeit durch die Wasserschutz- und vor allem Naturschutzbehörden aufgrund ihrer geringen personellen Kapazitäten nur unzureichend geleistet werden.

4.1.3.3 Bau- und Raumplanungsrecht sowie die immissionsschutzrechtlichen Vorgaben

Die Lokalisierung der Biogasanlagen bestimmt darüber, ob durch die Kapazitätskonzentrationen in bestimmten Gebieten Belastungen geballt auftreten und ggf. dort mit bereits vorhandenen Einflüssen zusammentreffen. Instrumente wie das Bau- und Raumplanungsrecht sowie die immissionsschutzrechtlichen Vorgaben für die Genehmigung von Biogasanlagen können keine flächenspezifische Steuerung des Energiepflanzenanbaus auf Schlagebene bewirken. Sie sind derzeit rechtlich so ausgestaltet, dass diese Steuerung in hohem Maße behindert wird (im Folgenden zusammengefasst aus von Haaren et al. 2013: 13). So können kleinere Anlagen (unter 500 kW elektrisch), die in der Praxis einen großen Teil der Anlagen ausmachen (78,6 % aller Biogasanlagen in der Region Hannover, vgl. Kap. 3.5.3), allein mit einer Baugenehmigung zugelassen werden, die keiner fundierten planerischen Vorbereitung bedarf. Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung und vorgeschriebener Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung sind nach der 4. BImSchVO (Bundes-Immissionsschutz-Verordnung) dagegen nur bei Großanlagen ab einer Feuerungswärmeleistung von mindestens 50 MW und eine standortbezogene Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) des Einzelfalls bei Anlagen ab 10 MW vorgeschrieben. Auch die UVP entfaltet keine Verpflichtung zur Wahl des besten Standortes von mehreren Alternativen. Dazwischen liegen Biomasseanlagen mit einer größeren Leistung als 500 kW elektrisch oder gewerbliche Anlagen, die nur in eigens hierfür ausgewiesenen Baugebieten genehmigt werden und ab einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW (nicht identisch mit der elektrischen Leistung) nach dem BImSchG (Bundes-Immissionsschutz-Gesetz) genehmigt werden. Weder die Baugenehmigung noch die immissionsschutzrechtli-

che Genehmigung ermöglichen aber eine räumliche Steuerung. Gleiches gilt für die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung, die zwar angewendet werden muss, aber nur die direkten und nicht die indirekten Folgen der Biogasanlagen kompensieren soll und auch kein Instrument ist, um wertvolle Gebiete vor Veränderungen zu bewahren. Generell ist zudem anzuzweifeln, ob die Gemeindeebene auf der die baurechtliche Genehmigung und die Ausweisung von Gewerbeflächen erfolgt, die Ebene ist, auf der neben dem Nutzen auch alle ökologischen Folgen und Kosten einer solchen Ausweisung anfallen. Die in Kapitel 3.5.5.3 (und Albert et al. 2014, 2016) untersuchten Beispiele für *Problems of fit* zeigen, dass Biogasanlagen durchaus über Gemeindegrenzen hinweg wirken. Allerdings zeigten sich auch Defizite bei der Genehmigung auf der regionalen Ebene: Vielfach nutzen die Genehmigungsbehörden ihre begrenzten Steuerungsmöglichkeiten nicht. So könnte die Stickstoffausbringung in Schutzgebieten zur Versagung der Genehmigung führen, sofern die zulässigen Grenzwerte für schutzwürdige Lebensräume überschritten werden (von Haaren et al. 2013).

4.1.3.4 Flächenspezifisch wirksame Kommunikationsinstrumente

Auch bei den flächenspezifischen Maßnahmen kann man auf das Engagement der Landwirte setzen. Dazu müssen diese aber noch stärker als bei den flächendeckenden erwünschten Maßnahmen durch Informationsbereitstellung und Beratung unterstützt werden. Der Ansatz der erfolgsorientierten Honorierung könnte auf einer solchen Basis ausgebaut werden, indem die Landwirte selbst die Flächen identifizieren, die für eine flächenspezifische Honorierung in Frage kommen.

Ein weiterer Baustein, mit dem sowohl flächenspezifische freiwillige Maßnahmen gefördert werden könnten als auch solche, die flächendeckend überall willkommen sind, wäre die Einbeziehung der Stromkunden und Energieerzeuger, die, ähnlich wie dies bei Nahrungsmittelproduzenten schon geschieht, einen Aufpreis für umweltschonend erzeugte Energie zahlen könnten. Solche Ansätze müssten durch die Energieerzeuger implementiert werden. Allerdings könnten sie durch rechtlich gesetzte Anreize gefördert und ebenso wie informell durch Informationen und Beratung für die Landwirte unterstützt werden.

4.1.4 Gesamtbewertung der Instrumente

Die Bewertung des verfügbaren Steuerungsinstrumentariums und seiner bisherigen Anwendung zeigt, dass die einzelnen Instrumente jeweils für sich genommen nicht in der Lage sind, die derzeit konstatierten Umweltprobleme des Energiepflanzenbaus zu lösen. Ohne Zweifel hätte aber ein vorausschauender konzertierter Einsatz des vorhandenen Instrumentariums unter Beachtung der gegenseitigen Abhängigkeiten der instrumentellen Wirkungen erheblich zur Problembewältigung beitragen können. Ein Grund für die mangelnde vorausschauende Koordination liegt vermutlich in der Zuständigkeit verschiedener politischer Ebenen und Verwaltungs-

sektoren. Entsprechende Koordinationsmängel waren allerdings schon vor dem EEG wirksam. Auch sind in der Sache Konflikte zwischen Landwirtschaft und Umweltschutz nicht neu (SRU 2002, 2004), sondern bestimmte Phänomene verschärften sich regional in kurzer Zeit und wurden so besonders deutlich. Positive Trends wie der Rückgang der Nitratbelastung im Grundwasser wurden zudem wieder rückgängig gemacht. Probleme in der Mehrebenensteuerung traten dadurch auf, dass die Bundesebene zwar Anreize setzte, gleichzeitig aber weder selbst konkrete Vorkehrungen gegen großräumige Nebenwirkungen traf (z.B. im Bereich der guten fachlichen Praxis), noch die unteren Ebenen in die Lage versetzte, regional und lokal die auftretenden gebietsspezifischen Wirkungen zu steuern. Die absehbaren Umweltfolgen des Eingriffs in die Agrarmärkte durch das EEG wurden sogar lange Zeit ausgeblendet – eine Politik, die bei der Zulassung eines neuen Arzneimittels nicht geduldet würde.

Bei den Einzelinstrumenten treten folgende Defizite besonders hervor:

- auf Bundesebene die aus Umweltsicht unzureichend konkreten Regelungen zur Fruchtfolge in den Vorgaben zur guten fachlichen Praxis und Cross Compliance (SRU 2013) sowie zum Düngereinsatz (SRU 2007);
- der unzureichende allgemeine Grünlandschutz in den CC-Regelungen,
- der Verzicht auf eine Ergänzung des Bau- und Raumordnungsrechtes zur Steuerung der Anlagen;
- die mangelnde Vorausschau der Folgen und Regelungsdefizite sowohl auf Landes- als auch Regionsebene oder ein mangelnder politischer Wille zur Folgenbekämpfung sowie eine erst spät und punktuell einsetzende Zielplanung für alle EE;
- in der Folge der Verzicht auf landesweite rechtliche Regelungen bzw. auf die Stärkung der Agrarumweltmaßnahmen zur Gegensteuerung zumindest im Bereich der flächenspezifischen Erhaltung von altem/wertvollem/multifunktionalem Grünland und der Förderung von Energiepflanzen-Dauerkulturen, die (kompensatorisch) Umweltentlastungen hätten bewirken können;
- der Verzicht auf eine verstärkte Ausgestaltung der Umweltberatung für Landwirte und Anlagenbetreiber, um deren Selbstregulationskapazitäten zu stärken;
- auf der regionalen Ebene die mangelnde Nutzung von Schutzgebietsausweisungen/Ausgestaltung von Verordnungen zumindest für einen gebietsspezifischen Grünlandschutz sowie das Nährstoffmanagement und der Vollzug dieses Schutzes;
- der Verzicht der Genehmigungsbehörden darauf, eine Zulassung in den vorgeschriebenen Genehmigungsverfahren zu versagen, wenn die Gefahr der Nährstoffüberfrachtung von Schutzgebieten bestand.

4.1.5 Empfehlungen

4.1.5.1 Optimierung der Mehrebenensteuerung

Die derzeitige, nicht flankierte Anreizpolitik für die Bioenergieerzeugung bewirkt viele unnötige Kollateralschäden und damit überflüssige Konflikte. Die Akzeptanz der erneuerbaren Energien bei gesellschaftlichen Akteuren und innerhalb der Bevölkerung wird verringert und dadurch der Ausbau behindert. Wenn die Potenziale der Erzeugung erneuerbarer Energien nachhaltig aktiviert werden sollen, ist es notwendig, sowohl bereits eingetretene Schäden zu mindern als auch das Wo und Wie eines zukünftigen Ausbaus zu optimieren (von Haaren et al. 2013). Maßnahmen vor Ort für einen umweltschonenden Energiepflanzenanbau richten sich vor allem auf anbaubezogene Maßnahmen (Wahl der Energiepflanze, Fruchtfolgengestaltung, Fruchtartenverteilung im Raum, Nährstoffmanagement), und landschaftsbezogene Maßnahmen wie die Erhaltung von Grünland- und Landschaftsstrukturen sowie anderen, besonders empfindlichen Naturressourcen. Die Instrumente zur Umsetzung solcher Maßnahmen sind z.T. vorhanden, aber vielfach ergänzungsbedürftig.

Der Ausbau des Steuerungsinstrumentariums muss beachten, dass Regelungsdefizite auf höheren Ebenen einen erhöhten Steuerungsbedarf vor Ort mit sich bringen. Es ist deshalb notwendig, das Steuerungsinstrumentarium immer in seinem Zusammenspiel zu betrachten und zu optimieren. Die folgenden Empfehlungen stehen unter diesem Vorbehalt. Werden auf den höheren, rahmensetzenden Ebenen von Bund und Land keine Anpassungen vorgenommen, blieben den in diesem Buch im Vordergrund stehenden regionalen und lokalen Ebenen nur wenige Steuerungsmöglichkeiten, die dann ggf. überstrapaziert werden müssen. So könnten die Regionen das Instrument der Schutzgebietsausweisung ausschöpfen. Insbesondere die Neuausweisung von Landschaftsschutzgebieten und die Gestaltung der Verordnungen böte die Möglichkeit, auf großen Flächen einen Mindestschutz der Naturressourcen herbeizuführen. Eine verstärkte Ausweisung von Schutzgebieten wäre aber voraussichtlich mit Effizienz- und Akzeptanznachteilen verbunden. Auf Landkreisebene und im Falle von Bebauungsplanaufstellungen auch auf Gemeindeebene könnte die Eingriffsregelung als ein Instrument gehandhabt werden, mit dem ein grundsätzlicher Verteilungskonflikt um die öffentlich nutzbaren Qualitäten von Landschaft – wenn auch nur ansatzweise – bewältigt werden kann: Die Nutznießer der EEG-Einspeisevergütung sollten immerhin die anlagebedingten Landschaftsbeeinträchtigungen umfassend und auch mit Blick auf die örtliche Bevölkerung kompensieren. Für Betriebe und Biogasanlagenbetreiber verbleibt die Möglichkeit, aktiv ihre Selbstregulation zu verbessern. Die Motivation der Landwirte zur Anlage zumindest von Blühstreifen ist insbesondere in Regionen mit hohen Maisanteilen und Bürgerprotesten bereits vorhanden.

Im Rahmen einer Mehrebenensteuerung könnte demgegenüber ein wirksameres und effizienteres Maßnahmenbündel angestrebt werden. Dieses beträfe auf der Bundesebene folgende Anpassungsoptionen:

- Durch ein verändertes EEG gewährte Privilegien könnten an bestimmte Auflagen gebunden werden, z.B. an Ökobilanzen mit dem Nachweis positiver Umweltwirkungen, die auch die Biodiversität und das Wasser einschließen. Eine Voraussetzung der Förderung könnte auch sein, dass die Region, in der eine Anlage genehmigt werden soll, oder der Anlagenbetreiber bestimmte Vorkehrungen z.B. zum Management des Stickstoffhaushaltes getroffen hat.
- Eine Konkretisierung der Regelungen zu Düngereinsatz und Fruchtfolgen in der guten fachlichen Praxis und den CC-Regelungen würde für die Betriebsebene im gesamten Bundesgebiet vergleichbare Verursacherpflichten konstituieren. Wünschenswert wären die Einführung einer mindestens viergliedrigen Fruchtfolge und Mindestwerte für die Anteile der einzelnen Fruchtarten. Dass eine Aufweitung der Fruchtfolgen gerade durch die Produktion von Bioenergie-Biomasse möglich ist, belegen die Forschungsergebnisse von Karpenstein-Machan & Weber (2010). Ggf. kann eine regionale Komponente eingeführt werden, die eine zu starke regionale Homogenisierung des Anbaus verhindert. Eine solche regionalisierte Regelung wäre kein Tabubruch in der gfP. Das Pflanzenschutzrecht ermöglicht z.B. regionale Erleichterungen in Gemeinden mit besserer Landschaftsstrukturausstattung. Weitere Ergänzungen der gfP sollten auch für den Anbau von Dendromasse und anderer mehrjähriger Energiepflanzenkulturen erfolgen. Ein Pauschalverbot des Umbruchs älterer Grünlandflächen mit besonderer Funktion für die Biodiversität und den Klimaschutz und pauschale Kompensationsregeln für alle übrigen Grünlandflächen wären weitere geeignete Maßnahmen. Zur Lösung des Überdüngungsproblems liegen eine Vielzahl von Vorschlägen vor, die hier nicht wiederholt werden sollen (s. SRU 2007) (aus: von Haaren et al. 2013).
- Je nachdem wie stark die gute fachliche Praxis weiter ausgestaltet wird, ergibt sich ein mehr oder minder großer Bedarf im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz, den Rahmen für die Agrarumweltmaßnahmen und ihren Anteil am Gesamt-ELER-Budget der Länder auszugestalten.
- Im Bau- und Raumordnungsrecht sollten bessere Möglichkeiten zur räumlichen Steuerung der Anlagen geschaffen werden. So wären im Baurecht die Privilegien für Biomasseanlagen im Sinne des § 35 Abs. 1 Nr. 6 BauGB einzuschränken. Auch könnte hier geprüft werden, inwieweit die baurechtliche Eingriffsreglung auf Folgewirkungen in der Landnutzung ausgeweitet werden kann. Voraussetzung wäre aber eine Anpassung der Landwirtschaftsklausel im BNatSchG. Im Raumordnungsrecht kann die Möglichkeit der Beschränkung der Anlagen-Entwicklung auf Eignungsgebiete stärker ausgestaltet werden (vgl.

hierzu Buhr et al. 2013; Wiehe et al. 2010). Eine Ausweisung von Eignungsgebieten für Biogasanlagen in der Regionalplanung ist bereits heute im Prinzip möglich, aber völlig unüblich. Ebenfalls denkbar und zunächst näherliegend wäre der Versuch, den Standort der Anlagen in der Flächenutzungsplanung auf Gemeindeebene zu steuern.

Auf Landesebene können folgende Optionen eine Verbesserung der Steuerung herbeiführen:

- Die Möglichkeiten der Nitratrichtlinie der EU zur Ausweisung besonders empfindlicher Gebiete könnten ausgestaltet und mit den Zielen der Planungen nach Wasserrahmenrichtlinie abgestimmt werden.
- Der Grünlandschutz nach CC sollte durch Regelungen ergänzt werden, die altes Grünland sowie für den Biotopschutz oder multiple Ökosystemleistungen bedeutsames Grünland einem generellen Umbruchverbot unterstellt, das auch die pflegebedingte Grundbodenbearbeitung (Pflügen, Grubbern, Fräsen) von Grünlandflächen einschließt.
- Die Agrarumweltmaßnahmen sollten mit höheren Anteilen an den ELER-Mitteln beteiligt sein, als dies bisher der Fall ist (bisher lediglich Mindestanteil umgesetzt). Flächendeckend sollten nur wenige, überall wünschenswerte Maßnahmen oberhalb der durch gfP und CC definierten Schwelle angeboten werden (ökologischer Landbau, anspruchsvolle Maßnahmen der Fruchtfolgegestaltung, Anlage von Landschaftsstrukturen, mehrjährige Energiepflanzen). Der Grund hierfür sind Effizienznachteile durch die zufällige und teils nicht zielführende Allokation der flächendeckend angebotenen Maßnahmen. Stattdessen sollte die Förderung sich auf Gebietskulissen mit Bedarfsräumen konzentrieren. Die Grundlagen für deren Ausweisung stehen überwiegend mit den Landschaftsrahmenplänen bereit. Ergänzt werden sollte allerdings eine weitere Priorisierung, die Synergien und Effizienzgewinne durch Multifunktionalität berücksichtigt (Galler et al. 2015). Mit der neuen Förderperiode bietet sich damit die Chance, in dem begrenzenden Rahmen der freiwilligen Teilnahme situations- und standortspezifische Steuerungswirkungen zu entfalten. Als Nachteil könnte gewertet werden, dass mit öffentlichen Geldern Umweltleistungen „zurückgekauft" werden, deren Gefährdung (neben der Ursache im globalen Agrarmarkt) auch auf ein Bundesgesetz (das EEG) zurückzuführen ist. Ebenfalls nachteilig ist die zeitliche Begrenzung der Verträge auf in der Regel 5 Jahre. Eine weitere Maßnahme zur Steigerung der Effizienz der AUM und Motivierung der Landwirte wäre eine Ausweitung der ergebnisorientierten Honorierung und der Auktionsmodelle.
- Die Selbstregulationskapazitäten auf der Ebene der landwirtschaftlichen Betriebe und Biogasanlagen könnten gestärkt werden, indem Informationen durch landesweite Umweltinformationssysteme frei zur Verfügung gestellt

werden und die Umweltberatung für Landwirte und Anlagenbetreiber durch eine Förderung im Rahmen von ELER gestärkt wird.

4.1.5.2 Vorschläge für die regionale Ebene

Die regionale und Gemeinde-Ebene ist in besonderer Weise geeignet, durch Instrumente der räumlichen Planung wie Schutzgebietsausweisungen und die Genehmigungsverfahren zur Allokation von Biogasanlagen auf den Bioenergiepflanzenanbau einzuwirken.

Die in diesen Vorhaben erarbeiteten Verfahren und Methoden zur Simulation von räumlichen Szenarien zur Fruchtartenverteilung sowie zur Abschätzung möglicher Auswirkungen auf Landschaftsfunktionen und Ökosystemleistungen können raumkonkrete Hinweise für die räumliche Planung liefern. Diese Informationen können dabei helfen, eine informationsbasiertere Debatte über angemessene Zielsetzungen für den Ausbau von Bioenergie – und perspektivisch auch weiterer EE-Quellen – zu führen. Durch das Aufzeigen summativer Wirkungen mehrerer benachbarter Biogasanlagen können Hinweise für die Zulassung und die relative Position der Anlagen zueinander erhalten werden. Die dargestellten Methoden zur Erfassung potenzieller Auswirkungen auf Ökosystemleistungen ermöglichen, mögliche Auswirkungen zu bilanzieren. Somit können die Veränderungen besser verstanden und einfacher kommunizierbar werden. Und nicht zuletzt ermöglichen die flächenspezifischen Analysen Hinweise darauf, welche Flächen von besonderer Bedeutung für Natur und Landschaft sind bzw. welche Flächen einem besonders hohen Beeinträchtigungsrisiko unterliegen und damit von hoher Priorität für den Schutz und angepasste Nutzung sind. So haben bspw. Wiehe et al. (2010) gezeigt, wie auf der Basis der Landschaftsplanung empfindliche Gebiete für den Ausschluss aus der Maiserzeugung identifiziert und wie bei der Anlagenplatzierung die Umweltwerte und -empfindlichkeiten berücksichtigt werden könnten.

Defizite bestehen nach wie vor in der Ausgestaltung von Schutzgebietsverordnungen, die in vielen Fällen die mit der Entwicklung der Bioenergieproduktion und dem Biomasseanbau verbundenen Auswirkungen auf Natur und Landschaft oft nicht ausreichend berücksichtigen. Das betrifft insbesondere die Landschaftsschutzgebiete, bei denen zum einen die vorhandenen Steuerungsmöglichkeiten nur unzulänglich ausgeschöpft werden und zum anderen weitere Möglichkeiten bspw. zu gebietsspezifischen (landschaftstypischen) Vorgaben zur Fruchtartendiversität auf Landesebene geschaffen werden sollten.

Literatur

Albert, C., von Haaren, C. & Mahnkopf, B. (2008). Potenzialanalyse für Landschaftspflege und Naturschutzprodukte – Ermittlung des Flächen- und Finanzierungsbedarfs sowie des Erzeugungspotenzials anhand der Landschaftsrahmenplanung. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 40(11), 373–378.

Albert, C., Aurbacher, J., von Haaren, C., Mahnkopf, B. & Petermann, C. (2009). Ökonomische Auswirkungen zukünftiger Agrarentwicklungen auf die Landschaftspflege und mögliche Beiträge der Aufpreisvermarktung von Naturschutzprodukten im Landkreis Diepholz. *Berichte über Landwirtschaft* 87(3), 357–379.

Albert, C., Aronson, J., Fürst, C. & Opdam, P (2014). Integrating ecosystem services in landscape planning: requirements, approaches, and impacts. *Landscape Ecology* 29(8), 1277-1285.

Albert, C., Hermes, J., Neuendorf, F., vonHaaren, C. & Rode, M. (2016). Assessing and Governing Ecosystem Services Trade-Offs in Agrarian Landscapes: The Case of Biogas. Land 5(1), 1-17.

Buhr, N., Wiehe, J., Steinkraus, K., Wolf, U., Rode, M. & Kanning, H. (2010). Handlungsempfehlungen für die natur- und raumverträgliche Optimierung des Biogas- und des BtL-Pfades. In: Rode, M. & Kanning, H. (Hrsg.): *Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade.* S. 252-273, Stuttgart.

Buhr, N., Rode, M. & Kanning, H. (2013). Effectiveness of Planning Instruments for Minimizing Spatial Conflicts of Biogas Production. *European Planning Studies* 22, 1711-1734.

Dickel, R., Reiter, K., Roggendorf, W. & Sander, A. (2010). *Halbzeitbewertung von PROFIL - Teil II- Kapitel 13, Zahlungen für Agrarumweltmaßnahmen (ELER-Code 214).* Braunschweig, Dezember 2010, 148 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.ml.niedersachsen.de/download/53754/Teil_II_-_Kapitel_13_-_Zahlungen_fuer_Agrarumweltmassnahmen_Code_214.pdf

Freese, J., Klimek, S., Marggraf, R. (2011). Auktionen und ergebnisorientierte Honorierung bei Agrarumweltmaßnahmen. *Natur und Landschaft* 86(4), 156-159.

Fuchs, D., Hänel, K., Lipski, A. & Reich, M. (2011). National bedeutsame Achsen des Biotopverbunds.In: Bundesverband Beruflicher Naturschutz e.V. (BBN) (Hrsg.): *Jahrbuch für Naturschutz und Landschaftspflege* Band 58/1: Ökologische Netzwerke für den Naturschutz: Schutzgebiete, Biotopverbund, Gewässer. Bonn, S. 43-51.

Galler, C., von Haaren, C. & Albert, C. (2015) Optimizing environmental measures for landscape multifunctionality: Effectiveness, efficiency and recommendations for agri-environmental programs. *Journal of Environmental Management* 151, 243-237.

Gay, H.; Osterburg & B. Schmidt, T. (2004). Szenarien der Agrarpolitik - Untersuchung möglicher agrarstruktureller und ökonomischer Effekte unter Berücksichtigung umweltpolitischer Zielsetzungen. *SRU Materialien zur Umweltforschung 37*.

Karpenstein-Machan, M. & Weber (2010). Energiepflanzenanbau für Biogasanlagen: Veränderung der Fruchtfolgen und der Bewirtschaftung von Ackerflächen in Niedersachsen. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 42(10), 313-320.

Knispel, S. & Rode, M. (2010). Agrarumweltmaßnahmen im Biomasseanbau – Lösungsansätze zur Steigerung ihrer Attraktivität. In: Reich, Michael & Rüter, Stefan (Hrsg.): *Energiepflanzenanbau und Naturschutz*. Umwelt und Raum, Band 1, 43-66, Cuvillier-Verlag, Göttingen.

SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2002). *Umweltgutachten 2002 - Für eine neue Vorreiterrolle*. 549 S., Stuttgart: Metzler-Poeschel.

SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2004). *Umweltgutachten 2004 - Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern*. Bundesdrucksache 15/3600.

SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2007). *Umweltverwaltungen unter Reformdruck - Herausforderungen, Strategien, Perspektiven*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 2013). Die Reform der europäischen Agrarpolitik: Chancen für eine Neuausrichtung nutzen. *Kommentar zur Umweltpolitik* 11, 32 S. Gesichtet am 30.4.2017: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/05_Kommentare/2012_2016/2013_01_KzU_11.pdf?__blob=publicationFile

Ulber, L., Klimek, S., Steinmann, H.-H., Isselstein, J. & Groth, M. (2011). Implementing and evaluating the effectiveness of a payment scheme for environmental services from agricultural land. *Environmental Conservation* 38(4), 464–472.

von Haaren, C. & Bathke, M. (2008). Integrated landscape planning and remuneration of agri-environmental Services. Results of a case study in the Fuhrberg region of Germany. *Journal of Environmental Management* 89: 209–221.

von Haaren, C., Palmas, C., Boll, T., Rode, M., Reich, M., Niederstadt, F. & Albert, C. (2013). Erneuerbare Energien – Zielkonflikte zwischen Natur- und Umweltschutz. In: BBN (Hrsg.): Neue Energien – Neue Herausforderungen: Naturschutz in Zeiten der Energiewende. *Jahrbuch Naturschutz und Landschaftspflege* 59, 18-33.

Wiehe, J., Buhr, N., Wolf, U., Kanning, H. & Rode, M. (2010). Planerische Koordinierung für einen natur- und raumverträglichen Ausbau energetischer Biomassepfade. In Rode, M. & Kanning, H. (Hrsg.): *Ökologische Optimierung der Produktion und energetischen Nutzung von Biomasse – Natur- und raumverträglicher Ausbau energetischer Biomassepfade (SUNREG II)*. ibidem-Verlag Stuttgart. S. 241-253.

4.2 Synthese: Methoden und Werkzeuge für eine soziale, ökonomische und ökologische Realisierung einer nachhaltigen Bioenergieversorgung

Hans Ruppert

Bioenergie ist ein mengenmäßig und qualitativ wichtiger Teil einer nachhaltigen Energieversorgung. Pflanzliche Energie gehört als Wärme (und Licht) zur grundlegenden Versorgung des frühen Menschen. Gleichzeitig wurde auch der Arbeits- und Mobilitätsbedarf schon früh mit Bioenergie gedeckt, indem Zug-, Transport- und Reittiere mit pflanzlicher Biomasse ernährt wurden. Bioenergie aus Holz oder von Holzkohle ist auch heute noch für viele Menschen in Entwicklungsländern die Hauptbasis zum Kochen und Heizen.

Heute liefern Energiepflanzen neben Wärme auch Strom und Treibstoffe. Bioenergie sollte als flexible und bedarfsgerecht liefernde Energiequelle immer im Kontext mit anderen erneuerbaren Energieformen gesehen werden. Insbesondere Biogas ist hier ein anpassungsfähiges Multitalent. Energetisch gesehen braucht die Biogaserzeugung wesentlich weniger Fläche als die flüssigen Biotreibstoffe, muss sich aber z.B. der Photovoltaik in der Flächeneffizienz geschlagen geben (s. Kap. 1.3.2.5). Der optimale Mix insbesondere der Bioenergie mit den anderen erneuerbaren Energieformen wird sehr stark von örtlichen natürlichen Gegenheiten bestimmt und ist ein Schlüssel für das Gelingen einer optimalen Energieversorgung.

Alle Planungen für eine Kombiversorgung mit erneuerbaren Energien müssen mit den Fragen beginnen: Wieviel Energie brauche ich wirklich und wie kann ich die Energie am effektivsten gewinnen und einsetzen? Was ist der optimale erneuerbare Energiemix, der am Ort sinnvoll erzeugt werden kann? Sinnvoll heißt, dass alle Planungen realistisch die Einflüsse auf die Landschaft inklusive der Ökosysteme berücksichtigen, von den Menschen mitgetragen werden und eine vernünftige Einkommens- bzw. Ausgabenperspektive für alle Beteiligten aufweisen müssen, also dem Prinzip der Nachhaltigkeit folgen.

In Abbildung 4.1 ist grob angerissen, welche übergeordneten Aspekte ausgehend von den nationalen und regionalen Ausbauzielen in die Ausgestaltung eines nachhaltigen lokalen oder regionalen Bioenergienutzungskonzeptes einfließen sollten.

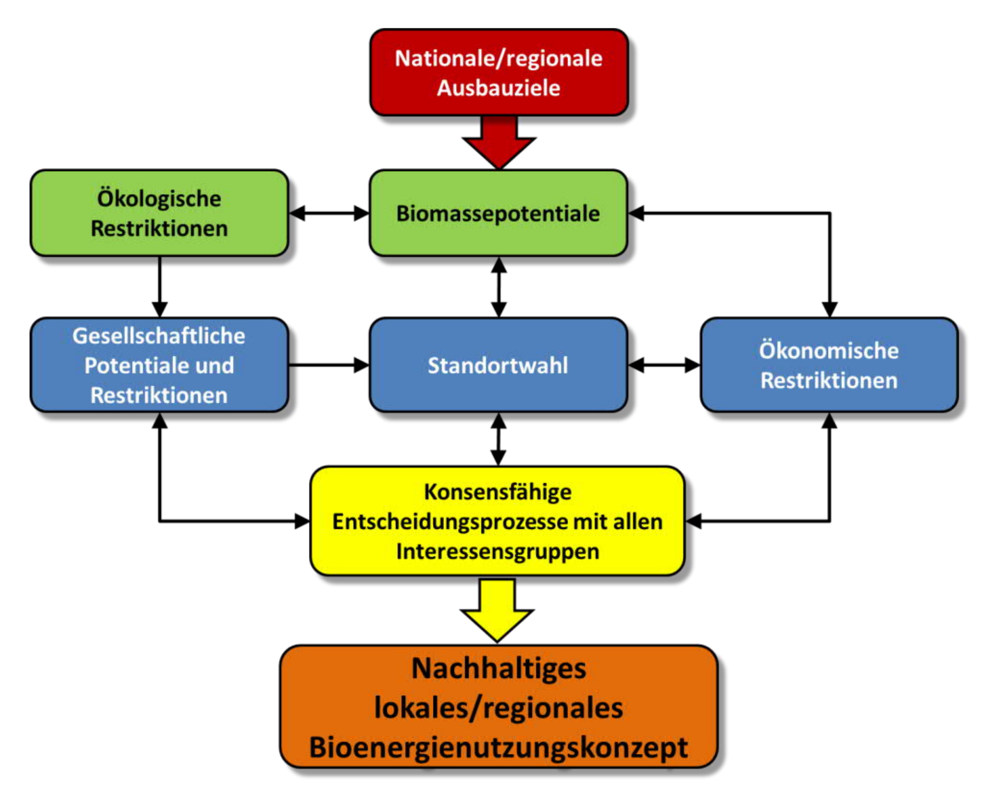


Abbildung 4-1: Übergeordnete Aspekte, die ein nachhaltiges lokales oder regionales Bioenergienutzungskonzept ausmachen

In diesem Band wurde vorwiegend auf die Bioenergie als Strom- und Wärmeversorger abgehoben, nur wenig auf die Treibstoffschiene. Es folgen die wichtigsten Angelpunkte aus unseren Untersuchungen, die als Argumentations- und Gestaltungsbasis für eine aktive Wende zu den Erneuerbaren - insbesondere der Bioenergie - dienen können. Es werden zahlreiche sich ergänzende und häufig miteinander kombinierbare Methoden und Instrumente für eine Entscheidungsfindung angeboten, die ein sachliche Auseinandersetzung unterstützen und Konflikte möglichst nicht entstehen lassen bzw. beseitigen sollen (s. auch Kap. 2.1.11, 2.2.5, 3.1, 3.8). Hier einige grundlegende Informationen und ein Angebot an Instrumenten, die eine Objektivierung der Diskussion bei den Entscheidungs- und Realisierungsprozessen unterstützen soll.

1. Nahrungsmittelpflanzenanbau hat Vorrang vor Energiepflanzenanbau. Die globalen Biomassepotentiale für energetische und Rohstoffzwecke sind nur unter folgenden Bedingungungen als hoch einzustufen: a) wenn z.B. der Pflanzenanbau für die uneffektive tierische Ernährung, der mehr als die Hälfte der globalen Ackerflächen belegt, reduziert wird, b) wenn Anbau-, Transport- und Wegwerfverluste, die bei 30-50 % liegen, deutlich reduziert werden und c)

wenn die gesundheitsschädliche Übergewichtigkeit, die global bereits jeden 10. Menschen betrifft, durch angepasstere Ernährung eingeschränkt wird. (Kap. 1.1).

2. Leitlinie der Energiewende sollten die Hauptprinzipien der Nachhaltigkeit sein: das Vorsorge- und Achtungsprinzip, das Konsistenz-, Partizipations-, Effizienz-, Gerechtigkeits- und Suffizienzprinzip. Wenn diese Inhalte dieser Prinzipien zu Herzen genommen werden, wird eine konfliktfreiere Diskussion deutlich erleichtert. Ziel der Einhaltung dieser Prinzipien ist, die Zukunftfähigkeit der angestrebten Maßnahme zu gewährleisten. Die teils recht divergenten ökologischen, gesellschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Querbeziehungen bei der Planung und Durchführung müssen in eine von der Breite der Bevälkerung her akzeptierte Kompromissform einfließen (Kap. 1.3, 2.1, 3.1).
3. Die Bioenergieproduktion und -versorgung sollte immer im Kontext mit anderen, vor Ort gewinnbaren erneuerbaren Energieformen ausgestaltet werden unter Einbezug wichtiger Effizienzmaßnahmen (Kraftwärmekopplung, Hausisolierung etc.) (Kap. 1.3.2.5, 2.2.1).
4. Erfolgreich sind Umstellungsmaßnahmen auf erneuerbare Energien nur dann, wenn ein Transformationsprozess auf lokaler und betrieblicher Ebene erfolgt. Die Beteiligten wie Landwirte, landwirtschaftliche Berater, Anlagenbetreiber, Naturschützer, Bürgermeister und Verwaltung, Klimaschutzmanager, insbesondere aber auch interessierte Bürger sind zusammenzuführen, um über faktenorientierte Diskussionen bis hin zu ethischen und ästhetischen Aspekten die Basis für gesamtheitliche Ausgestaltung der Energiewende zu erreichen. Die Komplexität des Findens eines gemeinsamen Weges und dessen Kommunikation in der breiteren Öffentlichkeit erhöht die Akzeptanz der Maßnahmen bei allen Beteiligten. Dieses Vorgehen dient der Fixierung der lokalen Präferenzen, führt zu Transparenz und Konfliktvermeidung und legt die Grundlage für eine aktive Partizipation an der Energiewende (Kap. 2.1.2, 2.2.1, 3.1, 3.6, 3.7, 3.8).
5. Unterstützt werden kann die gemeinsame Entscheidungsfindung beispielsweise durch Planungswerkstätten, durch die Anwendung flächenbezogener Planungsmethoden für verschiedene Energieträger mit dem Instrument 100prosim, der MCDA (Multiple-Criteria Decision Analysis), Anwendung von BioSTAR (Erfassung der Biomassepotentiale) (Kap. 2.2.2, 3.1, 3.4, 3.5, 3.8, 5.1, 5.2).
6. Vor einer Entscheidung bezüglich der Flächen für den Energiepflanzenanbau sollte nachgeforscht werden, ob es im Umfeld einer Anlage kontaminierte Standorte sind. Solche Flächen liegen meist in oder in der Nähe von Industrie- und Ballungsräumen oder auch in Überflutungsarealen größerer Flüsse. Sie können in Deutschland bis zu 10 % der Ackerfläche ausmachen und sollten bevorzugt für eine energetische Nutzung hergenommen werden. Hierdurch kann die Produktion kontaminierter Nahrungs- und Futtermittel verhindert

werden. Es muss in die Planungen einbezogen sein, dass die Pflanzen von kontaminierten Flächen ausschließlich in Biogasanlagen genutzt werden und die Gärsubstrate wiederum auf die kontaminierten Felder zurückgebracht werden. Eine Kontamination unbelasteter Flächen wird so vermieden. Zusätzlich werden hierbei die vorher von den Flächen entzogenen Nährstoffe sowie organisches Material recyclet, sodass zusätzliche Düngemaßnahmen weitestgehend entfallen und Kosten eingespart werden können (Kap. 2.1.9, 3.10.

7. Mit den Landwirten muss diskutiert werden, ob mit *business as usual* (weiterso wie bisher) der bioenergetische Teil der Energiewende geschuldert werden kann. Hierzu wurden neuartige Konzepte erstellt wie z. B. der integrative Energiepflanzenanbau statt Monokultur, Zweikulturnutzung etc., welche auch ökologisch vielfältige Vorteile bieten (Steigerung der Artenvielfalt, Vermeidung von Erosion). Hier gilt es, durch überzeugende Argumente und Vorschläge die Akzeptanz bei den Landwirten zu erhöhen (Kap. 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 3.3, 3.5). Bei Diskussionen sollte auf das erwähnte kostensparende Nährstoffrecycling hingewiesen werden.
8. Das neu geschaffene Modell BioSTAR kann für verschiedene Energiepflanzen standortspezifisch ausgezeichnete Voraussagen für die Erträge machen, wobei insbesondere klimatische und Bodenfruchtbarkeitsaspekte zusammenfließen. BioSTAR ist ein wichtiges Entscheidungshilfewerkzeug. Es hilft, den Anbau von Energiepflanzen von den Erträgen her lokal wie auch regional für zahlreiche Energiepflanzen besser durchzuplanen, auch vor dem Hintergrund ökologisch orientierter Nutzungskonzepte. Das Werkzeug kann auch als Basis für die Berechnung eventuell notwendiger Deckungsbeiträge dienen (Kap. 2.1.4, 2.1.6, 2.1.8, 2.2.2, 3.3, 3.4, 5.2).
9. Zusätzlich werden Steuerungsinstrumente wie MANUELA entwickelt, die auf lokaler und regionaler Ebene (z.B. Testbetriebe) Nutzungskonflike zwischen Energiepflanzenanbau einerseits und Natur- und Landschaftsschutz sowie Erholung und Tourismus andererseits lösen helfen. Die Werkzeugen MANUELA und BioSTAR ermöglichen auf einer objektiveren Datengrundlage Konfliktvermeidung oder Konfliktschlichtung und können Kontroversen bezüglich negativer ökologischer Auswirkungen beim Energiepflanzenbau vermeiden helfen (Kap. 2.1.3, 2.1.6, 2.1.8, 2.1.11, 2.2.2, 3.5)
10. Ökologisch sensible Flächen müssen besondere Aufmerksamkeit erfahren, da es hier sehr leicht zum Verlust an Artenvielfalt kommt, bei Moorböden zusätzlich zu Treibhausgasemissionen. Gerade der Anbau vielfältigerer Energiepflanzen auf normalen wie auch ökologisch sensiblen Flächen liefert die Chance zu einer höheren Artenvielfalt bei Pflanzen und Tieren. Allerdings wird die Umsetzung erschwert durch notwendige Kompromisse bei den Landwirten (Frage nach Deckungsbeiträgen) oder bei der Bevölkerung, die eventuell für Naturschutz-nahe Leistungen zahlen soll z.B. als Wärmeabnehmer aus einer Biogasanlage (Kap. 2.1.3, 2.1.4, 3.5, 3.6, 3.7).

11. Ein Energie- und Stoffstrommodell der gesamten Produktionkette vom Acker über die Pflanzen in die Biogasanlage und als Gärrest zurück auf den Acker zwecks Gewinnung von Strom und Wärme hilft, die Kosten der Bioenergieerzeugung eizuschätzen. Die Größe der Anlage, Substratverfügbarkeit, Kosten der Biomasssen, Auslegung des Nahwärmenetzes etc. dienen als variable Planungsgrundlage für den erwarteten Kostenaufwand (Kap. 3.2).
12. Für die optimale Planung eines Wärmenetzes in einem Dorf oder Stadtteil stehen Modelle zur Verfügung. Sie zeigen nicht nur den optimalen Verlauf des Netzes auf, sondern liefern auch Informationen, welche eher randlich liegenden Häuser doch noch an das Netz angeschlossen werden können. Solche Entscheidungen, wer sich z.B. am Wärmenetz angeschließen darf, sind gemeinschaftlich in der Dorfgemeinschaft zu treffen, da sie starke finanzielle Auswirkungen haben können, aber auch ausgrenzend wirken können (Kap. 2.1.7, 2.2.4, 3.2, 3.9).
13. Verbrennen von Holz sollte im Rahmen des Nachwachsens der Wälder und der herkömmlichen Holznutzung erfolgen. Rostfeueraschen sollten nach Möglichkeit zurück in den Wald verbracht werden, um Nährstoffkreisläufe zu schließen (hier besteht Uneinigkeit). Wärmetauscher-, Abscheider- und Flugaschen sollten separat gesammelt und auf eine Deponie entsorgt werden, da diese Aschen stark erhöhte anorganische und organische Schadstoffgehalte aufweisen. Bei den neuesten, gut geregelten Öfen kann der Ausstoß organischer Substanzen durch komplette Verbrennung nahezu komplett reduziert werden, und auch die mit Schwermetallen kontaminierte Menge an Feinstaub neben Schadgasen erheblich reduziert werden. Hier ist auf entsprechende Qualitäten bei Feuerungsstättenkauf zu achten. Generell sind Pelletöfen durch besser geregelte Verbrennung umweltfreundlicher als Holzhackschnitzel- und Scheidholzfeuerstätten (Kap. 2.1.10, 3.11).
14. Der Einfluss der Bioenergie auf die regionalen Wirtschaftkreisläufe ist bedeutsam, da der größere Teil der Finanzen in der Region bleibt bzw. aus der Region stammt (Kap. 2.2.3, 3.2, 3.9).
15. Gerade durch die Bioenergie kann der ländliche Raum mit seinen häufig strukturellen und wirtschaftlichen Problemen (Abwanderung) gestärkt werden. Zusätzlich sind gemeinschaftliche Projekte wie z.B. ein Bioenergiedorf mit gemeinsamer Wärmeabnahme der Bevölkerung identitätsstiftend und wirken der Abwanderung der Menschen entgegen.

Diese kurzgefasst zusammengefassten Argumentationshilfen, Werkzeuge, Methoden, Beschreibungen von Vorgehensweisen etc. sind hoffentlich hilfreich, die Energiewende hin zu den Erneuerbaren zu befördern.

5 Appendix

Im Folgenden sind die Benutzerhandbücher für „Open-Source-Software zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (MCDA)“ und für das „Pflanzenmodell BioSTAR“ angefügt. Entsprechende Anwendungen für den Bereich Bioenergie sind in Kapitel 3.1 (MCDA) und Kapitel 3.4 (BioSTAR) zu finden. Die neusten Software-Versionen befinden auf den in diesen Kapiteln angegebenen Webseiten.

Die ebenfalls im Verbundvorhaben verwendete Managementsoftware für landwirtschaftliche Betriebe MANUELA (GIS-gestütztes Managementsystem für Naturschutz und eine nachhaltige Landwirtschaft) war ein wichtiges Instrument in Kapitel 3.5 (Optimierung des Energiepflanzenbaus im Hinblick auf Natur- und Landschaft). Diese Software enthält Module für Biodiversität, Landschaftsbild, Bodenerosion, Treibhausgasemissionen, Gute fachliche Praxis und Cross Compliance in der Landwirtschaft bis hin zu Kostenkalkulationen und Maßnahmen. MANUELA muss auf die jeweilige Detailsituation angepasst werden, was komplex ist. Ein allgemeines Benutzerhandbuch existiert nicht. Weitere Information befinden sich auf der Webseite: https://www.umwelt.uni-hannover.de/manuela.html.

5.1 Benutzerhandbuch zur Open-Source-MCDA-Software - Open-Source-Software zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung

Nils Lerche, Jutta Geldermann

5.1.1 Installation

5.1.1.1 Systemvoraussetzungen

Damit Sie das MCDA-Tool auf ihrem Computer ausführen können, muss das Computersystem mindestens die Voraussetzungen in Tabelle 5-1 erfüllen.

Tabelle 5-1: Voraussetzungen für die Anwendung der MCDA-Software*

Betriebssystem	Version	Arbeitsspeicher (RAM)	Festplatten-kapazität
Windows x86	Windows 7	128 MB	98 MB
	Windows Vista	128 MB	
	WindowsServer 2008	128 MB	
	Windows XP	64 MB	
Windows x64	Windows 7	128 MB	98 MB
	Windows Vista	128 MB	
	Windows Server 2008	128 MB	
	Windows XP	64 MB	
MAC OS X	10.7.3 und höher		
Linux x86		64 MB	58 MB
Linux x64			

*Zusätzlich muss auf Ihrem System Java 7.0 (oder aktueller) installiert sein. Die aktuelle Java-Version befindet sich auf der Internetseite: www.java.com/de/.

Hinweis: Unter Windows können Sie mit Hilfe der Eingabeaufforderung heraus-finden, welche Java-Version Sie installiert haben. Starten Sie dazu die Eingabeauf-forderung über den Windows-Startknopf und schreiben folgenden Befehl in das erscheinende Fenster: `Java-version`. Bestätigen Sie den Befehl mit Enter und Sie

bekommen die installierte Java-Version angezeigt. Erhalten Sie die Fehlermeldung *Unbekannter Befehl*, dann ist auf ihrem System keine Java-Version installiert.

5.1.1.2 Installation der Desktopversion

Die Desktopversion des MCDA-Tools muss nicht extra installiert werden. Wenn Sie das Programm in einem zip-Archiv vorliegen haben, entpacken Sie die darin enthaltenen Dateien in ein neues Verzeichnis. Anschließend können Sie das Programm mittels eines Doppelklicks auf die .jar-Datei starten.

5.1.2 Allgemeine Funktionen

Im Folgenden erhalten Sie einen Überblick über die verschiedenen Grundfunktionalitäten, die ihnen unabhängig von der verwendeten Methode zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung zur Verfügung stehen.

5.1.2.1 Auswahl einer Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung

Die Software bietet Ihnen die Möglichkeit verschiedene Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung anzuwenden. Die anwendbaren Methoden liegen als sogenannte Plugins vor, die Sie entweder über die Universität Göttingen (Professur für Produktion und Logistik 2016) beziehen oder aber selbst entwickeln können. Damit Sie auf die einzelnen Plugins zugreifen können, müssen diese in den dafür vorgesehenen Ordner kopiert werden. Den Ordner, mit dem Namen *plugins*, finden Sie an der gleichen Stelle wie das Programm selbst. Beachten Sie, dass Plugins immer die Dateiendung .jar haben müssen.

5.1.2.2 Speichern und Laden

Sie haben die Möglichkeit von Ihnen erstellte Entscheidungsprobleme zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder zu öffnen. Zum Speichern wählen Sie im Menü **Datei** die Funktion **Speichern**. In dem sich öffnenden Dateidialog haben Sie die Möglichkeit, den Dateinamen sowie den Speicherort der Datei zu bestimmen. Durch einen Klick auf **OK** wird das Entscheidungsproblem gespeichert. Während des Speicherns wird ein Hinweis im unteren rechten Bildrand angezeigt. Bitte beachten Sie, dass für ein umfangreiches Entscheidungsproblem der Speichervorgang einige Zeit beanspruchen kann. Damit die Daten vollständig gespeichert werden können, ist das Schließen des Programms während des Speichervorgangs nicht möglich.

Wenn Sie ein Entscheidungsproblem laden möchten, müssen Sie zunächst die Methode auswählen, mit dem das Entscheidungsproblem modelliert wurde. Danach können Sie im Menü **Datei** den Befehl **Laden** auswählen. Im sich öffnenden Dateiauswahldialog suchen Sie die Datei, die sie öffnen möchten und wählen **OK**.

5.1.2.3 Importieren

Mit dem Befehl **Importieren** im Menü **Datei** haben Sie die Möglichkeit eine Entscheidungstabelle, die in einem CSV-Format[34] vorliegt, in das Programm zu importieren. Um die Importierungsfunktion nutzen zu können, müssen Sie vorher eine Methode zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung ausgewählt haben (siehe Kap. 5.1.2.1). Bitte vergewissern Sie sich das die in der CVS-Datei gespeicherten Informationen auch zu der von Ihnen ausgewählten Methode passen.

5.1.2.4 Sprache festlegen

Unter dem Menü **Optionen** können Sie mit Hilfe des Befehls **Sprache** die im Programm verwendete Sprache einstellen. Die zur Verfügung stehenden Sprachen bekommen Sie in einer Liste angezeigt. Bitte beachten Sie, dass dies die im Hauptprogramm angebotenen Sprachen sind. Eine Sprache die hier auftaucht muss nicht zwangsläufig für die verschiedenen Plugins zur Verfügung stehen. Ist dies nicht der Fall, wird die Standardsprache des Plugins ausgewählt.

5.1.3 Anwendung einer Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung

5.1.3.1 PROMETHEE

Das MCDA-Tool verfügt über eine Implementation der von Brans et al. entwickelten Verfahrensgruppe PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluation; s. Brans et al 1986). Um das PROMETHEE-Verfahren anzuwenden, müssen Sie zunächst das entsprechende Plugin auswählen (siehe Kap. 5.1.2.1). Daraufhin öffnen sich sechs Registerkarten. Die ersten beiden Registerkarten **Kriterien** und **Alternativen** dienen der Formulierung des Entscheidungsproblems. Die Registerkarte **Outranking Relation** ist zur Datenbereitstellung, um die zugrundeliegenden Teilergebnisse der Ergebnisberechnung transparent zu gestalten. Die folgenden beiden Registerkarten **PROMETHEE I und II** stellen die Ergebnisse dar. Die letzte Registerkarte **Insensitivitätsintervalle** liefert eine Sensitivitätsanalyse. Sie können zwischen den einzelnen Registerkarten beliebig wechseln, sodass Anpassungen jederzeit vorgenommen werden können.

5.1.3.2 Registerkarte Kriterien

Auf der linken Seite bekommen sie die Kriterienhierarchie angezeigt, mit der sie die verschiedenen Kriterien anordnen können (Abb. 5-1). Wählen Sie mit der Maus ein Kriterium aus und drücken Sie auf den **Kriterium hinzufügen**-Button,

---

[34] CSV steht für *Comma Seperated Value* und beschreibt ein Dateiformat in dem einzelne Werte durch ein bestimmtes Trennzeichen, z. B. einem Komma, voneinander getrennt sind. Ein Programm mit dem CSV-Dateien erzeugt werden können ist u. a. Microsoft Excel.

um ein Kriterium unter dem ausgewählten Kriterium hinzuzufügen. Sie können hierdurch beliebig viele Ebenen einfügen. Wenn Sie ein Kriterium ausgewählt haben und den **Kriterium entfernen**-Button drücken, wird das entsprechende Kriterium gelöscht. Wenn das gelöschte Kriterium über Subkriterien verfügt, werden diese ebenfalls gelöscht.

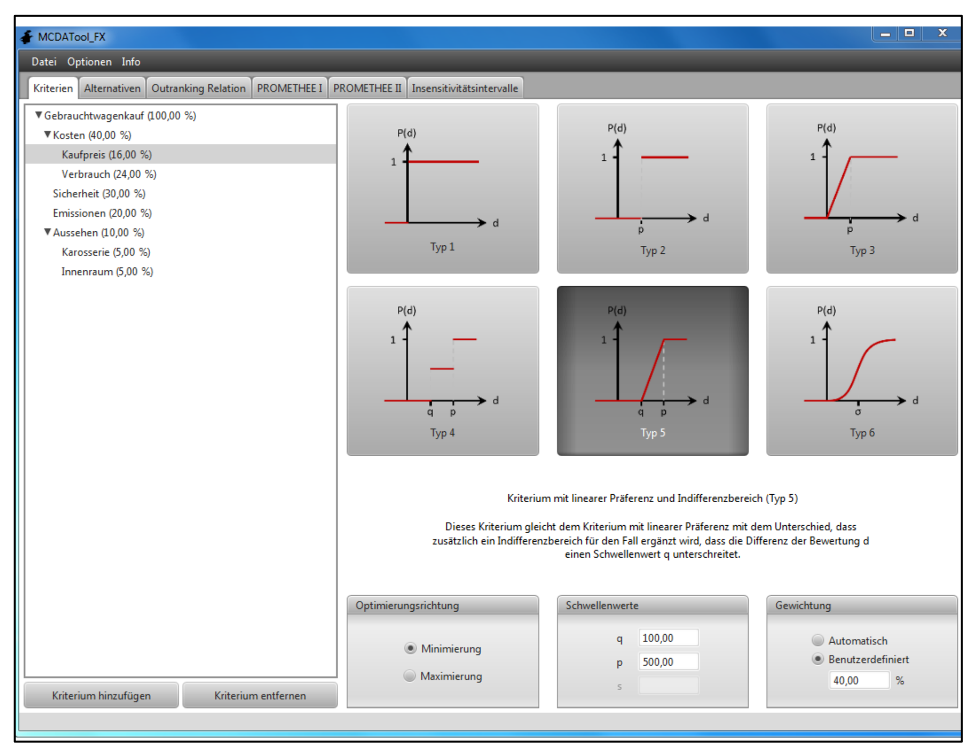


Abbildung 5-1: Die Registerkarte *Kriterien*

Auf der rechten Seite sehen Sie die Schaltflächen, mit denen Sie die Präferenztypen eines Kriteriums festlegen können. Beachten Sei hierbei, dass die Präferenzfunktion nur für das Kriterium auf der niedrigsten Ebene definiert werden kann. Dabei geben Ihnen die abgebildeten Funktionsverläufe eine erste Hilfestellung, wie sich die Präferenztypen auswirken. Zusätzlich erhalten Sie nach der Auswahl eines Typs eine Beschreibung angezeigt, die Ihnen bei der Wahl helfen sollte. Wird ein Kriterium minimiert, spiegelt sich der Verlauf der Präferenzfunktion an der y-Achse.

Unter den Präferenztypen stehen Ihnen drei weitere Eingabemöglichkeiten zur Verfügung. Über die Radio-Buttons im Kasten *Optimierungsrichtung* können Sie festlegen, ob Sie das ausgewählte Kriterium maximieren oder minimieren möchten. Rechts daneben befinden sich im Kasten *Schwellenwerte* die Eingabefelder, mit de-

nen Sie die Schwellenwerte für die jeweilige Präferenzfunktion festlegen können.[35] Der letzte Kasten *Gewichtung* beinhaltet das Eingabefeld über das Sie die Gewichtung des Kriteriums festlegen können. Sie haben hierbei die Wahl, entweder das Gewicht automatisch festlegen zu lassen (Gleichgewichtung der Kriterien) oder die Gewichte individuell zu bestimmen. Gültig sind Eingaben von 0 bis 1 wie z. B. 0,375, um ein Kriterium mit 37,5 % zu gewichten. Sämtliche Eingaben werden überprüft. Die Werte und werden rot unterlegt, wenn Sie ungültige Angaben machen.

Wichtig: Beachten Sie beim manuellen Eingeben der Gewichtungen, dass Sie in dem Feld *Gewichtung* das jeweilige Gewicht in Relation zu den weiteren Kriterien angeben, die dem gleichen Oberkriterium zugeordnet werden. Somit müssen die gewählten Gewichte auf der gleichen Ebene in Summe 1 ergeben. In der Kriterienhierarchie werden hingegen die Gewichte angegeben, die sich hinsichtlich des gesamten Entscheidungsproblems ergeben. Diese werden automatisch durch die Software mittels einer Multiplikation ermittelt, die hierarchisch den zugrundeliegenden Pfad eines jeden Kriteriums ausgehend vom Gesamtziel entlang läuft. Aus diesem Grund weicht das angegebene Gewicht in der Kriterienhierarchie von dem eingetragenen Wert im Feld *Gewichtung* ab.

5.1.3.3 Registerkarte Alternativen

Bevor Sie einzelne Alternativen erstellen, sollten Sie die Kriterienhierarchie vollständig erarbeitet haben (Abb. 5-2). Sie können nur Werte für Alternativen hinterlegen, wenn feststeht, auf welches Kriterium sich diese Werte beziehen. Zusatzangaben wie Präferenzfunktionen, Schwellenwerte und Gewichte müssen Sie jedoch noch nicht festgelegt haben. Um neue Alternativen anzulegen, betätigen Sie den **Alternative hinzufügen**-Button. Zum Löschen einer Alternative wählen Sie eine Zelle in der Spalte einer Alternative aus und drücken den **Alternative löschen**-Button. Den Namen der Alternative können Sie über einen Doppelklick auf den Spaltenkopf ändern. Die Einheiten, in denen die Kriterien gemessen werden (optional) und die Kriterienausprägungen können Sie eingeben, sobald die entsprechende Zelle markiert ist. Bestätigen Sie den Wert mit der **Enter-Taste**, so wird automatisch die nächste Zelle markiert und sie können den nächsten Wert zuweisen.

[35] Bei Präferenzfunktionen mit Präferenzschwellenwert p und Indifferenzschwellenwert q muss darauf geachtet werden, dass der Wert für p größer ist als der Wert für q. Daher empfiehlt es sich, zunächst den p-Wert einzutragen.

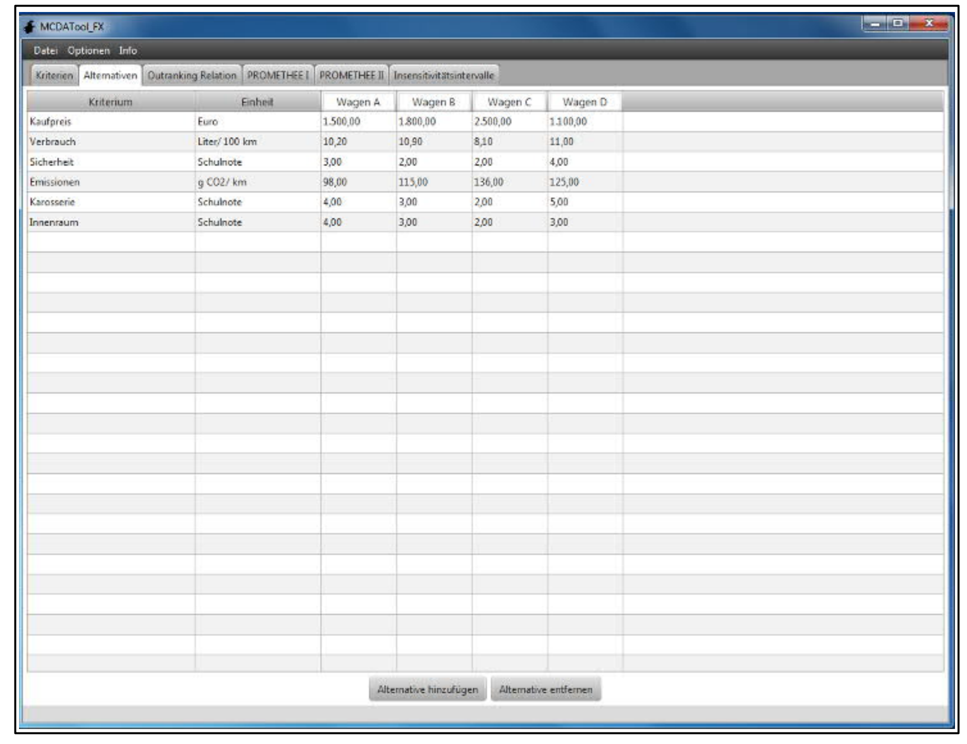


Abbildung 5-2: Die Registerkarte *Alternativen*

5.1.3.4 Registerkarte Outranking-Relation

An dieser Stelle können Sie die Ergebnisse der Berechnungen nachvollziehen. Die Berechnung startet mit dem Anwählen der Registerkarte (gilt auch für die Registerkarten PROMETHEE I und PROEMTHEE II). In der Tabelle können Sie die einzelnen Outranking-Relationen ablesen sowie die Aus- und Eingangsflüsse für jede Alternative. Wenn Sie mit dem Cursor auf die einzelnen Outranking-Relationen gehen, werden Ihnen zudem in einem kleinen Fenster die Präferenzwerte angezeigt, die sich aus den paarweisen Vergleichen hinsichtlich der einzelnen Kriterien ergeben.

5.1.3.5 Registerkarte PROMETHEE I

Hier wird Ihnen das Ergebnis der Aggregation der Daten durch Anwendung von PROMETHEE angezeigt (Abb. 5-3). So werden einerseits im oberen Kasten mittels eines Säulendiagramms die Ausgangs-, Eingangs- und Nettoflüsse für alle Alternativen dargestellt.



Abbildung 5-3: Die Registerkarte *PROMETHEE I*

Im unteren Kasten wird andererseits die Rangfolge der Alternativen in Form einer partiellen Präordnung abgebildet. Die Alternativen werden hierbei durch farbige Knoten repräsentiert, in denen der (eventuell abgekürzte) Name der Alternative sowie die Aus- und Eingangsflüsse aufgeführt sind. Das besondere an der partiellen Präordnung ist, dass neben Präferenz und Indifferenz auch Unvergleichbarkeiten dargestellt werden können. Unvergleichbarkeiten resultieren hierbei aus dem Vergleich von Aus- und Eingangsflüssen. Sollte der Ausgangsfluss im Vergleich von zwei Alternativen zwar höher sein, aber der Eingangsfluss auch höher ausfallen, so liegt Unvergleichbarkeit vor. Diese wird darüber visualisiert, dass keine gerichtete Verbindung zwischen den Alternativen besteht.

5.1.3.6 Registerkarte PROMETHEE II

In dieser Registerkarte wird die Ergebnisdarstellung im Rahmen von PROMETHEE II abgebildet (Abb. 5-4). So werden zum einen im oberen Kasten die einzelnen Flüsse aufgeführt, wobei im unteren Kasten an dieser Stelle die Totalordnung aufgeführt ist. Diese basiert auf den Nettoflüssen, die der Differenz von Aus- und Eingangsfluss einer jeden Alternative entsprechen. Somit wird das Erstellen

einer eindeutigen Rangfolge ermöglicht. In den einzelnen farbig markierten Knoten wird daher der zu der Alternative gehörende Nettofluss aufgeführt.

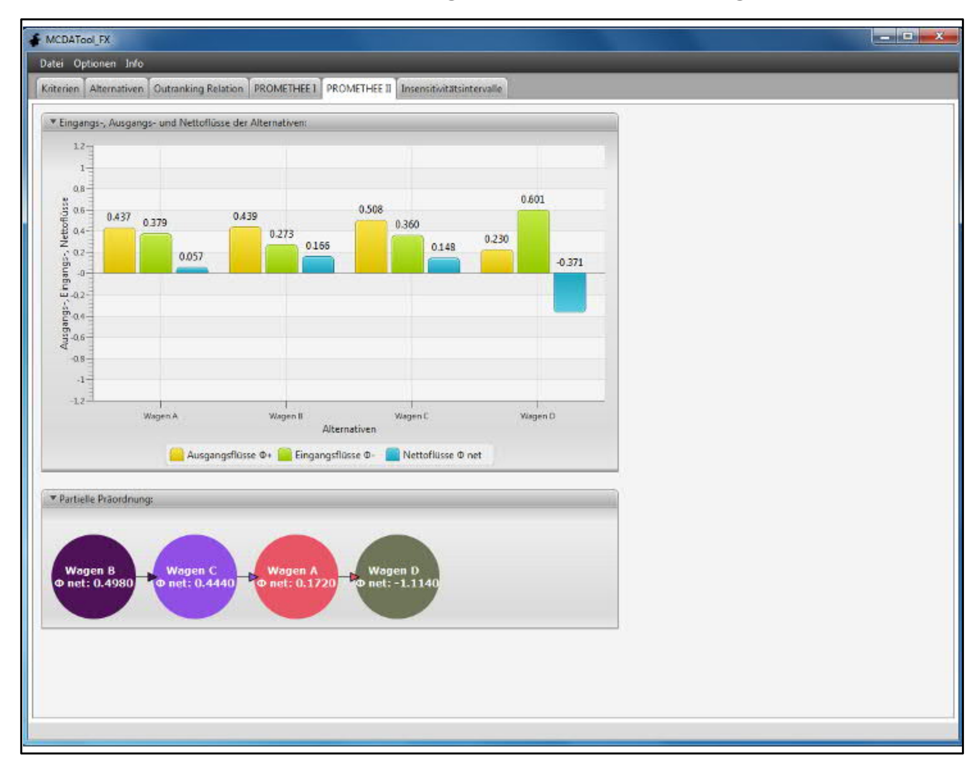


Abbildung 5-4: Die Registerkarte *PROMETHEE II*

5.1.3.7 Registerkarte Insensitivitätsintervalle

Insensitivitätsintervalle sind eine Darstellungsform für eine Sensitivitätsanalyse. Ein Insensitivitätsintervall gibt an, inwieweit die Veränderung der Gewichtung eines Kriteriums ausgehend vom ursprünglich gewählten Wert die ursprünglich erzielte Rangfolge ändern würde. Die Änderung der Rangfolge wird hierbei dadurch erkennbar, dass sich zwei Geraden schneiden (Abb. 5-5). Ein enges Intervall (d.h. ein Schnittpunkt nahe der ursprünglichen Gewichtung) ist ein Indiz dafür, dass die erzielte Rangfolge sich leicht verändern lässt.

Mittels der graphischen Visualisierung wird zudem anhand der Steigung der Geraden für die einzelnen Alternativen verdeutlicht, welche Alternative durch das Kriterium unterstützt wird und wie intensiv dieser Effekt ausgestaltet ist im Vergleich zu den anderen Alternativen. Hierdurch können besonders entscheidungsrelevante Kriterien identifiziert werden.

Für jedes Kriterium wird ein individuelles Insensitivitätsintervall angezeigt. Mittels der obig zentral angeordneten Wahlfläche kann zwischen den einzelnen Kriterien gewechselt werden.

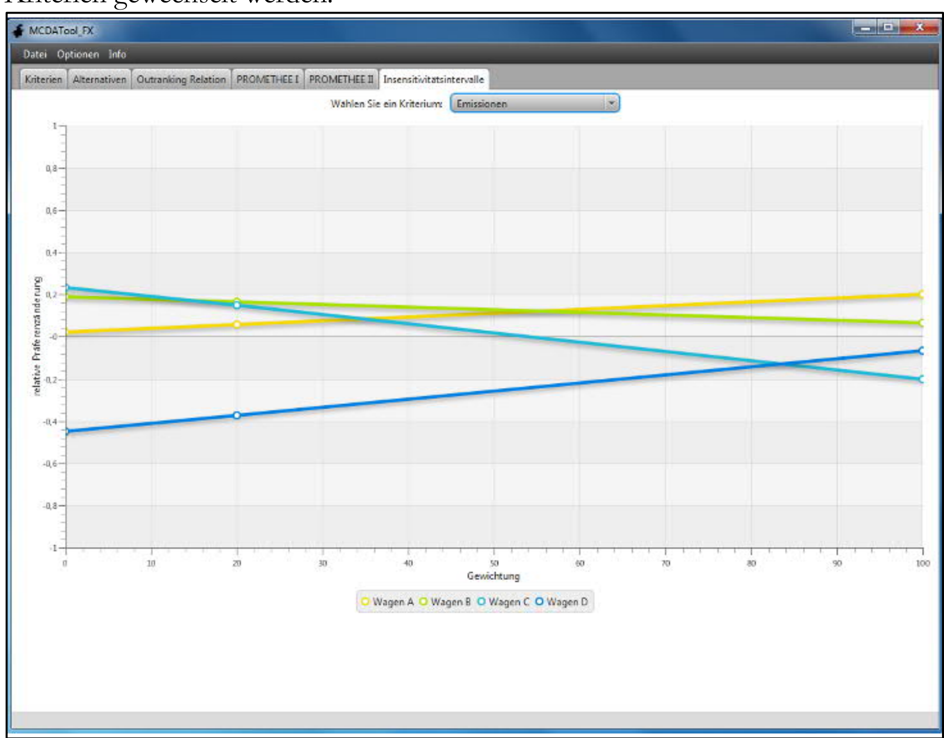


Abbildung 5-5: Die Registerkarte Insensitivitätsintervalle

Literatur

Brans, J.P., Vincke, P. & Mareshal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operations Research* 24, 228-238.

Professur für Produktion und Logistik (2016). *Software zur Entscheidungsunterstützung* (mit Leitfaden- und Software-Link). Gesichtet am 30.4.2017: https://www.uni-goettingen.de/de/multimedia--software/171915.html

5.2 Benutzerhandbuch für das Pflanzenmodell BioSTAR Version 0.5.6



Entwickler: Roland Bauböck, Cesar Revilla

5.2.1 Softwareanforderungen

Java Runtime Environment 7 (32 oder 64 bit; getestet bis Version 2014) und Microsoft Office Access 2007/2010 (32 oder 64 bit). Die installierte Office Version und die Version Java Runtime Environment müssen beide entweder 32 or 64 bit sein.

5.2.2 Fähigkeiten der BioSTAR Software

BioSTAR (Biomass Simulation Tool for Agricultural Resources) ist ein generisches Pflanzenmodell, welches insbesondere für die Ertragsmodellierung von boden- und klimaabhängigen Agrarbiomassepotenzialen entwickelt worden ist.

Derzeit lassen sich mit dem Modell die standortbezogenen Erträge und Wasserverbrauchsparameter für verschiedene Winterungen, Sommerungen und die Dauerkulturen durchwachsende Silphie und schnellwachsende Baumarten berechnen. Es können jedoch auch neue Kulturarten hinzugenommen werden, sofern die erforderlichen Pflanzenparameter (siehe Pflanzenparameter unten) bekannt sind.

Simulationen können entweder mit Tages- oder Monatsmitteln von Wetterdaten durchgeführt werden.

Aufgrund der Softwarearchitektur des Modells (Ein- und Ausgabedaten werden in Access-Datentabellen hinterlegt) lassen sich große Datensätze mit vielen Einzelflächen leicht importieren und verarbeiten.

Durch die Vergabe von standortbezogenen Identifikationsnummern lassen sich die von BioSTAR generierten Ausgabewerte leicht in ein GIS importieren und somit räumlich darstellen.

Typische Ausgabewerte des Modells sind z.B. die potenzielle oberirdische Biomasse einer Kultur, der Fruchtertrag, der Bodenwassergehalt am Ende des Modellierungszeitraumes oder die Wasserverbrauchsparameter der Kultur sowie eine eventuelle Versickerung an einem Standort.

Kurze Beschreibung der Modellfunktionen:

- Biomasseakkumulation
- Bestandesentwicklung

- Blattflächenentwicklung
- Evapotranspiration
- Bodenwasserhaushaltsmodell

Biomasseakkumulation

BioSTARs primärer Wachstumsmotor (Biomasseakkumulationsmethode) ist kohlenstoffbasiert (Azam Ali et al. 1994), aber alternativ kann auch eine strahlungsbasierte Methode (RUE-Methode), eine Wasserproduktivitätsmethode (WP-Methode) oder eine transpirationsbasierte (BTR-Methode) vom Benutzer für die Simulation des Biomassezuwachses verwendet werden. Die Kohlenstoff-basierte (CO_2)-Methode verwendet hierfür pflanzenspezifische CO_2-Austauschfunktionen und Veratmungskoefizienten, um die Nettoakkumulation von Biomasse in Tagesintervallen zu simulieren. Auch wenn nur Klimamonatswerte vorliegen, werden diese in Tagesschritten verarbeitet.

Die Netto-Biomasseakkumulation kann hiernach durch pflanzenspezifische Temperaturreaktionskurven und eventuelle vorliegende limitierende Einflüsse von Wasser- und Stickstoffmangel im Bodenprofil abgesenkt werden.

Im Falle der strahlungsbasierten Methode wird ein empirischer, pflanzenspezifischer Faktor, die Strahlungsnutzungseffizienz (*radiation use efficiency*, RUE) (Monteith 1977) verwendet, um die tägliche Biomasseakkumulation pro Flächeneinheit zu berechnen.

Im Falle der Wasserproduktivitätsmethode (WP-Methode) wird ebenfalls ein empirisch ermittelter Faktor (WP) nach Steduto et al. (2007) verwendet, um über das Verhältnis von Transpirationswasser zu Biomassebildung pro Flächeneinheit den Ertrag zu simulieren.

Die vierte Methode berechnet die tägliche Biomasseakkumulation über eine Gleichung aus atmosphärischem Dampfdruckdefizit, dem Biomasse-Transpirationskoeffizienten (*biomass transpiration ratio*, BTR) und der aktuellen Transpirationsrate (Tanner & Sinclair 1983).

Je nach Wahl der ET_0-Methode (es stehen vier im Modell angelegte Methoden zur Verfügung), können auch mit reduzierten Wetterdatensätzen (z.B. nur Temperatur und Niederschlag) Simulationen durchgeführt werden (siehe unter erforderliche Eingangsdaten).

Pflanzenentwicklung

Die Simulation der Bestandesentwicklung im Verlauf einer Simulationsperiode wird über pflanzenspezifische Entwicklungskurven erreicht und als BBCH/EC-Stadiumswert widergegeben. Diese Skala läuft von 0 (Aussaat) über 48 (maximale Blattfläche), 65 (Blüte) bis zur Vollreife (90-100). Ausnahmen bilden hierbei die mehrjährigen Kulturen, bei denen zwar dieselbe Entwicklungsskala verwendet wird, bei denen aber die numerischen Werte nicht den jeweiligen Entwicklungsstadien (sie gelten primär für Getreide) entsprechen.

Die Entwicklungsgeschwindigkeit einer Kultur kann für sechs verschiedene Perioden in der Pflanzenentwicklung angepasst und somit kalibriert werden (siehe unter Pflanzenparameter).

Die Entwicklung der Winterungen enthält z.B. immer eine Winterruhe und läuft, je nach Kultur von Ende August eines Jahres bis zum Sommer des folgenden Jahres.

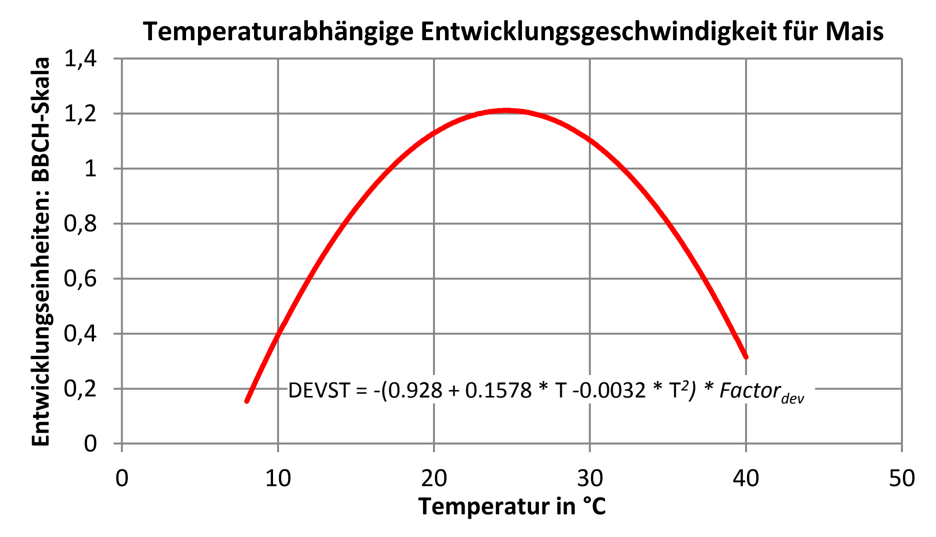


Abbildung 5-6: Temperaturabhängige Entwicklungsgeschwindigkeitskurve für Mais (Einheiten der y-Achse sind BBCH-Stadiumszuwächse pro Tag).

Die Entwicklung von Sommerungen läuft typischerweise von März/April eines Jahres bis zum Sommer oder Herbst desselben Jahres. Die Entwicklung der mehrjährigen Kulturen (KUP, Silphie) läuft typischerweise vom Frühling eines Jahres bis zum Herbst oder Winter des folgenden (Silphie) oder des dritten, vierten oder fünften Jahres (KUP). Im Gegensatz zu anderen Pflanzenmodellen verwendet BioSTAR keine Wachstums-Gradtage, um die Pflanzenentwicklung zu steuern, sondern temperatur- und pflanzenparameterabhängige Wachstumskurven, die in Tagesschritten die Wachstumsgeschwindigkeit des Bestandes vorgeben (Abb. 5-6).

Blattflächenausdehnung

BioSTAR benutzt eine optimierte BFI(Blattflächenindex)-Kurve, um Blattflächenexpansion und Seneszenz im Verlauf der Bestandesentwicklung zu simulieren.

Diese optimierte BFI-Kurve folgt einer Gauss'schen Normalverteilungskurve mit dem Scheitelpunkt der Kurve im Bereich der maximalen Blattexpansion (dimensionsloses Entwicklungsstadium = 1-1,1; BBCH-Stadium = 60) (Abb. 5-7). Der Scheitelpunkt der Kurve kann über das Modell vom Benutzer für jede Kultur erhöht oder abgesenkt werden.

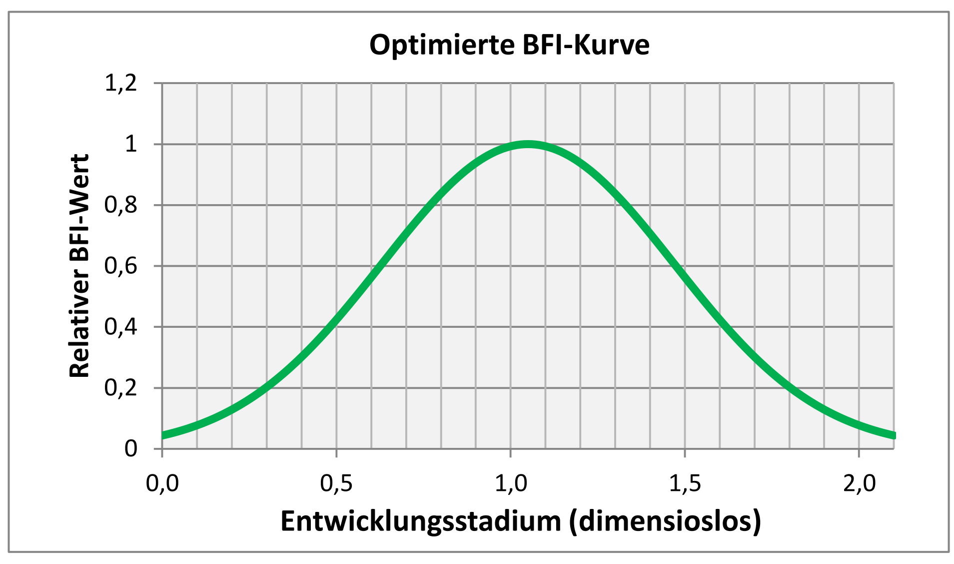


Abbildung 5-7: Optimierte BFI-Kurve mit dimensionslosem Entwicklungsstadium auf der x-Achse und dem relativen BFI-Wert auf der y-Achse.

Evapotranspiration

BioSTAR bietet dem Nutzer vier verschiedene Methoden zur Berechnung der Wasserhaushaltskomponenten Evaporation und Transpiration an. Die Fotosynthesebasierte Methode nutzt den berechneten Brutto CO_2-Umsatz des Modells um die entsprechenden Transpirationsverluste über die Pflanzenstomata zu bestimmen.

Die Basis für diese Methode ist die Annahme, dass der sich verändernde Gradient von Wasserdampf vom Blattinneren zur Atmosphäre, der Gradient von CO_2 vom Blattinneren zur Atmosphäre sowie die Moleküldurchmesser der beiden Gase das Austauschverhältnis und die Austauschmengen zwischen Blatt und Atmosphäre bestimmen. Daher lässt sich die Transpirationsrate mit der Kenntnis der Fotosyntheserate bestimmen. Eine entsprechende Bodenevaporationsrate wird mit Hilfe einer exponentiell abnehmenden BFI-Funktion und einer Evapotranspirationsgleichung nach Turc berechnet.

Methoden 2, 3 und 4 sind häufig verwendete ET_0 – Berechnungsmethoden (Penman-Monteith, Turc, Blaney-Criddle). Jede der vier Methoden kann mit einer der vier Wachtumsmotoren kombiniert werden, sofern die erforderlichen Klimaparameter vorhanden sind.

Bodenwasserhaushalt

Der Bodenwasserhaushalt wird in einem mehrschichtigen, eindimensionalen Modell dargestellt. Die einzelnen Bodenschichten (1-16) erhalten vom Benutzer spezifizierte Bodenartenkürzel bzw. Namen, über die das Programm die erforderlichen Parameter (van Genuchten) zur Berechnung der vom Bodenwassergehalt abhängigen Saugspannung einliest. Wasserbewegungen können sowohl abwärts (bei Sätti-

gung) als auch aufwärts (Stauschicht) gerichtet sein. Liegt ein anhand von Bodenuntersuchungen ermittelter Wert für die nFKWe (nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in mm) vor, so kann dieser verwendet und in die Bodendatentabelle (Spalte NFKWE) eingetragen werden. Liegt ein Wert für die aus dem Grundwasser verfügbare Wassermenge (in mm pro Tag) vor (kapillarer Aufstieg bei grundwasserbeeinflussten Böden), so kann dieser in der Spalte „H2OCAPD" eingetragen werden. Der Bodenwasserhaushalt wir nach einer einfachen Bilanzierung (Zustrom in eine Schicht von oben plus Aufstieg aus dem Grundwasser minus Entnahme durch die Wurzeln und Verdunstung minus Versickerung in die untere Schicht) vorgenommen.

5.2.3 Datenanforderungen

Die Eingabedaten die für eine Simulation notwendig sind bestehen aus einem Satz Wetter- und Bodendaten, die jeweils für einen Standort gelten.

Die Wetterdaten können entweder monatlich gemittelt (mittlere Tagestemperatur, mittlere Luftfeuchte, mittlerer Strahlungswert, mittlere Windgeschwindigkeit, Summe des Niederschlages) oder als Tageswerte vorliegen.

Die Bodendaten müssen als Körnungsklasse nach FAO/WRB (USDA) oder nach der deutschen KA4/KA5 oder nach der Bodenschätzung für jeden Horizont klassifiziert sein (Abb. 5-8). Sind keine Horizonte bekannt oder ist das Bodenprofil homogen, kann auch eine Körnungsklasse für alle Bodenschichten angegeben werden.

Minimum an erforderlichen Wetterdaten:

- Niederschlag in mm (Tages- oder Monatssumme)
- Mittlere Temperatur in Grad Celsius (Tages- oder Monatswerte)

Optionale Wetterdaten:

- Globalstrahlung in Joule pro cm^3 pro Tag oder als Mittelwert für einen Monat
- Mittlere Luftfeuchte (Tag, Monat) als Anteil von 1 (1 = 100%)
- Mittlere Windgeschwindigkeit in cm/s (Tag, Monat)

Anmerkung: Wenn nur Niederschlag und Temperatur als Input verfügbar sind, kann das Modell nur mit der WP-Methode betrieben werden und die ET_0-Methode muss in diesem Fall temperaturbasiert sein (Blaney-Criddle). Wenn mindestens Niederschlag, Temperatur und Strahlung verfügbar sind, kann das Modell mit der RUE-Methode betrieben werden, und die ET_0-Methode muss strahlungs- und temperaturbasiert sein (Turc), oder einfach temperaturbasiert sein (Blaney-Criddle). Wenn mindestens Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtedaten verfügbar sind, kann das Modell mit der BTR- und der WP-Methode betrieben werden. Die ET_0-Methode muss in diesem Fall temperaturbasiert sein (Blaney-Criddle).

Für Simulationen in ariden Gebieten mit unter 50% rel. LF, kann die Turc ET_0-Methode verwendet werden, allerdings müssen hierfür die ggf. fehlenden

Luftfeuchtegehalte durch Schätz- oder Vergleichswerte in der „HAIRFR"-Spalte (Anteil Luftfeuchte) ergänzt werden.

Wenn Niederschlag, Temperatur, Strahlung, Luftfeuchtegehalte und Windgeschwindigkeit vorliegen, kann das Modell mit allen Wachstums- und ET_0-Methoden betrieben werden.

Alle ET_0-Methoden können mit allen Wachstumsmotoren (Wachstumsmethoden) kombiniert werden, wenn alle Eingangsdaten vorliegen.

Sollte die Windgeschwindigkeit nicht vorliegen (erforderlich für die CO_2- und die Penman-Monteith ET_0-Methode, kann diese als Näherungswert in die Wetterdatentabelle eingetragen werden. Dies ist deshalb möglich, da die Variabilität der Windgeschwindigkeit im Durchschnittsbereich (keine Sturmwetterlage o.ä.) sich nur geringfügig auf die Verdunstung auswirken.

Als Richtwerte für eine Schätzung der mittleren, normalen Windgeschwindigkeit kann angenommen werden:

- Orte mit niedrigen durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten: 1-2 m/s
- Orte mit mittleren durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten: 2 -3 m/s
- Orte mit hohen durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten: 3-5 m/s

Erforderliche Bodendaten

- FAO/WRB (USDA) oder Deutsche KA4/KA5 oder Bodenschätzungs-Korngrößenverteilungen für alle Horizonte des Bodenprofils oder selbst parametrisierte Bodenart (Abb. 5-8)
- Optionale Daten: Organischer Stickstoffgehalt im Bodenprofil (Pool für langsam und schnell mineralisierbaren organischen Stickstoff) in kg pro Hektar.

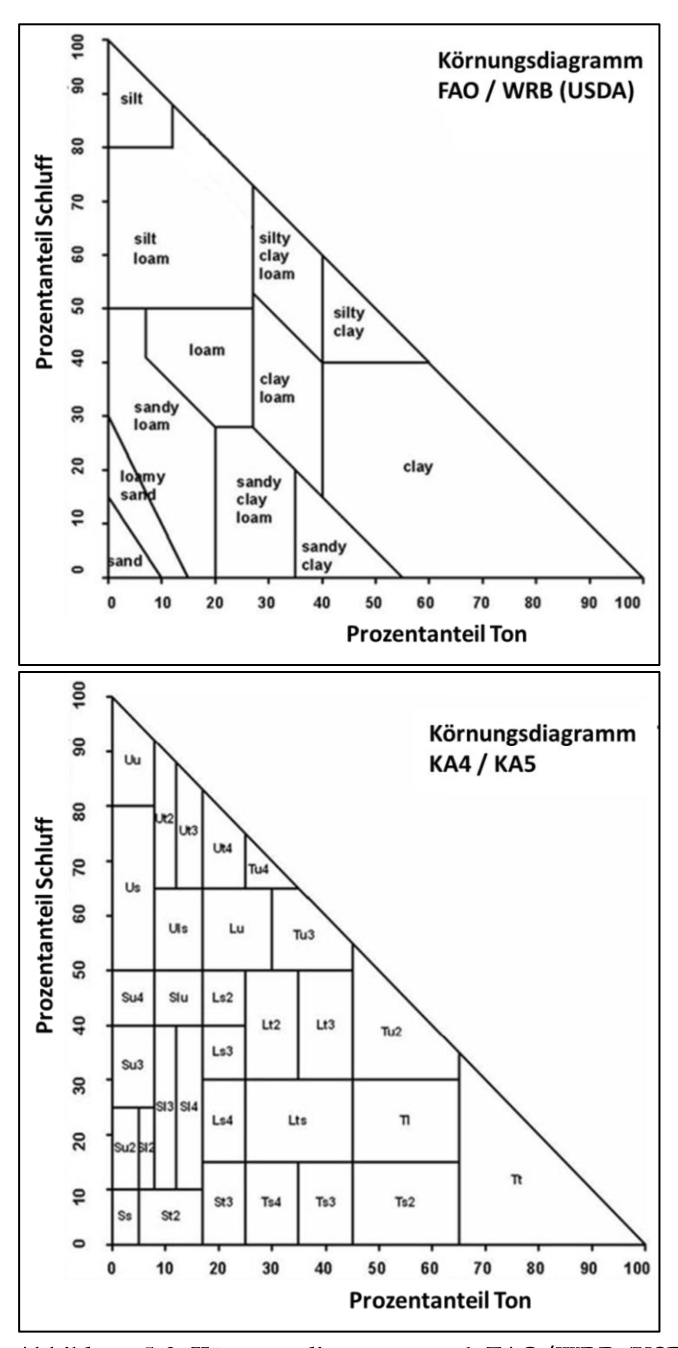


Abbildung 5-8: Körnungsdiagramm nach FAO/WRB (USDA) (oben) und Deutsche Kartieranleitung KA4 / KA5 (unten)

5.2.4 Software Design

Im Gegensatz zu anderen Pflanzenmodellen (AquaCrop, CropSyst), benutzt BioSTAR keine Textdateien um Ein-und Ausgangsdaten (Wetter, Boden, Ergebnisse) des Modells zu speichern.

Hingegen benutzt BioSTAR Microsoft Access Datentabellen in denen Standortdaten (Boden und Wetter), Pflanzen- und Bodenartenvariablen zusammen hinterlegt sind. Modellausgabedaten werden in derselben Datenbank in neu generierten Tabellen hinterlegt und können dort ausgelesen oder exportiert werden (Abb. 5-9).

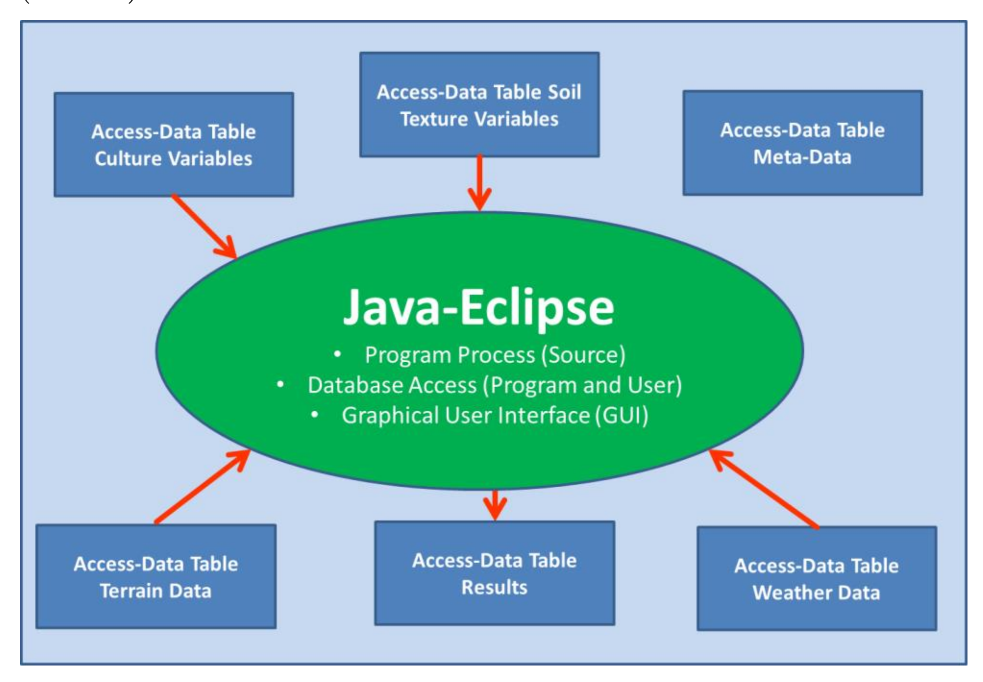


Abbildung 5-9: Diagramm der BioSTAR Softwarestruktur

5.2.5 Einstieg in die Modellierung mit BioSTAR

5.2.5.1 Die grafische Benutzeroberfläche von BioSTAR

Die Benutzeroberfläche von BioSTAR (Abb. 5-10) ist einfach gehalten und für den Start einer Simulation sind nur wenige nutzerspezifische Einstellungen erforderlich.

Direkt unter den „File“ und „Help“ Menüs wird der aktuell angewählte Pfad zur Datenbankverbindung angezeigt. Mit der „Search“ Taste kann eine neue Datenbankverbindung ausgewählt werden.

Unter der Datenbankauswahl befinden sich fünf Auswahloptionen (*Process, Process Log, Results, Statistics and, Error Log*). Beim Programmstart von BioSTAR ist automatisch die Process-Option angewählt.

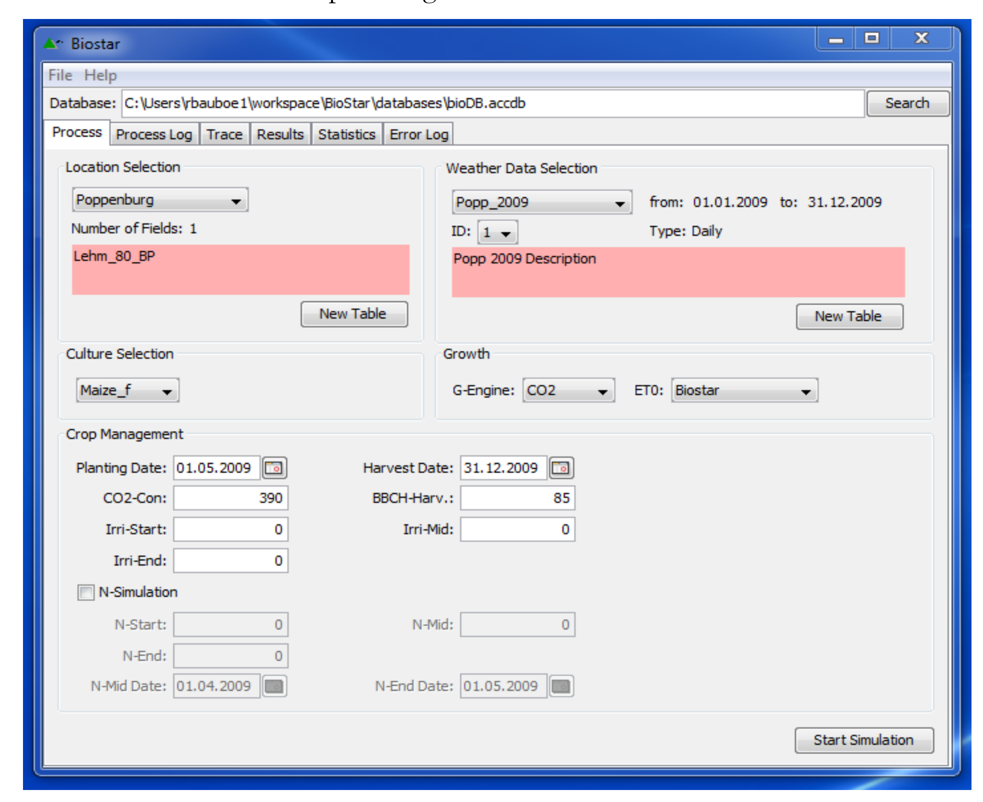


Abbildung 5-10: Die grafische Benutzeroberfläche der BioSTAR-Software.

„Process“ (Programmablauf) und „Process Log“ (Ablaufnachverfolgung)

Unter der Option „Process“ können neue Datenbanktabellen generiert, Benutzereinstellungen für Simulationen verändert und Simulationen gestartet werden.
Unter der Auswahl „Process Log“ wird für jeden Simulationslauf zur Überprüfung eine kurze Zusammenfassung der Simulationsparameter (welche Daten wurden verarbeitet, Ergebnisse der einzelnen ausgeführten Simulationseinheiten) ausgegeben.

Zur schnellen Einsicht (ohne in die Datenbank gehen zu müssen) wird unter der Option „Results“ zu jeder Simulation eine Ergebnistabelle von Ergebnissen angelegt.

„Results“ (Ergebnisse)

Unter der Option „Results” werden alle erfolgreich durchgeführten Simulationen mit ihren Ergebnissen aufgelistet. In Abhängigkeit von den Eingangsdaten (Wetter,

Boden) werden die Simulationsläufe in dem Ausklappmenü „Result Tables" aufgelistet. Gibt es mehr als einen Simulationslauf mit denselben Eingangsdaten, werden die verschiedenen Läufe unter dem Menü „Run No." in der entsprechenden Reihenfolge ihrer Generierung aufgelistet. Parallel dazu werden die Ergebnisdaten in die „Results" Tabelle in der jeweiligen Access Datenbank geschrieben.

„Trace" (Nachverfolgung) Menü

Unter diesem Menüpunkt können Entwicklungs- und Verlaufskurven verschiedener Variablen im Verlauf der Simulation als Kurven angezeigt werden.

„Error Log" (Fehlerdokumentation)

In der Fehlerdokumentation werden Fehlermeldungen angezeigt die während einer Simulation aufgetreten sind.

Unter den erläuterten Menüpunkten Process, Process Log, Results, Statistics und Error Log befinden sich die Auswahlfelder für die Bodendaten (Location Selction) und die Wetterdaten (Weather Data Selection) sowie für die Auswahl der Kultur (Crop Selection), die Wachstumsmethode (G-Engine) und die Auswahl der Verdunstungsmethode (ET0). In der unteren Hälfte der Benutzeroberfläche können Bewirtschaftungseinstellungen vorgenommen (Crop Management), und die Stickstoff-Simulation aktiviert und Düngergaben eingestellt werden.

5.2.5.2 Schritt für Schritt zum Simulationsergebnis

1. Schritt: Datenbankauswahl

Wenn BioSTAR zum ersten Mal geöffnet wird, ist der Pfad zur Access Datenbank (C:\.....) (Abb. 5-11) noch offen und muss daher erst angewählt werden. Hierzu die mitgelieferte (oder heruntergeladene) Datenbank bioDB_sample.accdb über den „Search" Knopf anwählen.

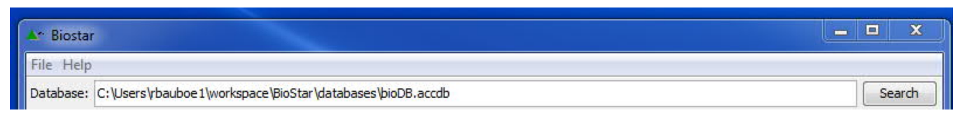


Abbildung 5-11: Datenbankauswahlfeld und „Search" Knopf

Diese Datenbank enthält alle Voreinstellungen und Metadaten die für den Programmbetrieb benötigt werden.

Metadaten (Erklärung hierzu unten) sollten nicht vom Benutzer geändert werden.

Durch kopieren dieser Datenbank (bioDB_sample.accdb) kann diese Datenbank in beliebigen Ordnern abgelegt und umbenannt werden. Auf diese Weise lassen sich Projekte deren Daten voneinander getrennt bleiben sollen gut verwalten und ordnen.

Wenn eine Datenbankverbindung ausgewählt ist, erscheinen in den Auswahlmenüs für den Bodenstandort und das Wetter (Location Selection, Weather Data

Selction unter dem „Process“ Menü) die in der Datenbank enthaltenen Boden- und Wettertabellen.

Wenn noch keine entsprechenden Tabellen in der Datenbank enthalten sind, bleiben die beiden Menüs leer.

Unter den Menüs werden Zusatzinformationen zu den Datentabellen angezeigt.

2. Schritt: Boden- und Wetterdaten (Location Selection, Weather Data Selection)

Location (Boden) Tabellen (7_Name)

Boden (Location) Tabellen werden mit einem nutzerspezifizierten Namen und einer automatisch vorangestellten 7 in der Access Datenbank gelistet (Abb. 5-12).
Anmerkungen:

- Wenn Tabellen von Hand (durch Kopieren und Einfügen) generiert werden oder umbenannt werden, muss auf die richtige Präfix Nummer (z.B. 7 für Bodentabellen) geachtet werden
- Alle Einträge in einer Bodentabelle enthalten eine vom Benutzer vergebene Flächennummer (FIELD_NO) und eine Wetteridentifikationsnummer (WEATHER_ID).
- Bodentabellen enthalten alle Bodeninformationen (Bodenart, Horizonte, Feldkapazität geogr. Breite, Anfangswassergehalt in %) einer Fläche oder mehrerer Flächen eines Standortes. Zusätzlich können hier auch noch Informationen zu den organischen Stickstoffgehalten in den Bodenprofilen hinterlegt werden.
- Bodentabellen enthalten entweder eine oder mehrere Einzelflächen (Bodeneinheiten). Softwaretechnisch sind sehr große Datensätze (z.B. Landkreise oder ganze Bundesländer in der Größenordnung von 10^6 Flächen) möglich, aus praktikablen Gründen (Übersichtlichkeit, Länge der Verarbeitung durch das Programm) bieten sich jedoch kleinere Datensätze eher an.
- Wenn mehrere Einzelflächen in einer Bodendatei enthalten sind, dann müssen diese über eine eindeutige Zuweisung zu einem Wetterdatensatz bekommen. Dies wir über die „Weather ID“ (Wetter ID) erreicht. Sollen alle Bodendatensätze einer Bodendatei mit demselben Wetterdatensatz verarbeitet werden, bietet es sich an, für alle Bodendatensätze und den Wetterdatensatz eine 1 eins zu vergeben.
- Auch wenn nur ein Boden- bzw. Wetterdatensatz in einer Datentabelle enthalten ist, muss eine Wetter ID vergeben werden (Bsp.: 1).
- Die Wetter ID verknüpft die Bodendaten mit den Wetterdaten (entweder 12 Einträge in einer Tabelle für Monatsmittel oder 365/366 Einträge für Tagesdaten).

- Weil große Bodendatentabellen mit vielen Einzelflächen (die alle einen eigenen Klimadatensatz besitzen) extrem große Tages-Klimadatentabellen benötigen würden (Bodenflächen multipliziert mit 365/366), bietet es sich an für solche Datensätze nur Monatsmittelwerte für das Klima zu verwenden.
- Bodendatensätze sollten immer eine eindeutige Flächennummer (FIELD_NO) vom Nutzer zugeteilt bekommen, sofern diese nicht schon über ein GIS (Geografisches Informationssystem) mitgeliefert worden sind. Diese ID ermöglicht das anschließende Verbinden der BioSTAR-Ausgabedaten mit einer Datentabelle im GIS.
- Das Modell ist derzeit so ausgelegt, dass zwischen maximal 16 verschiedenen Bodenhorizonten (Dezimeterintervalle) im Bodenprofil unterschieden werden kann. Wenn über mehrere Dezimeterintervalle kein Bodenartenwechsel auftritt, wird einfach für die entsprechenden Schichten immer das gleiche Bodenartenkürzel eigetragen.
- Die Schicht „HOR_DEEP“ bezeichnet den Bereich des Bodenprofils, der unterhalb 150 cm liegt. Ab hier wird von einer homogenen Bodenschicht ausgegangen. Für die Modellverbesserung besteht hier noch Anpassungsbedarf. Für die Modellierung von Ackerkulturen, mit deren relativ geringen Wurzeldichte unterhalb 150 cm, ergeben sich hier aber vermutlich nur geringe Verzerrungen hinsichtlich des Wasserhaushaltes.
- Jedes der 16 Dezimeterintervalle in einem Bodenatensatz muss mit einem alphanumerischen Kürzel versehen werden.
- Alle Kürzel und Bodenartenbezeichnungen sind in der Datenbank *bioDB_sample.accdb* in der Tabelle „HorizonVariables” hinterlegt und können in dieser Form für die Bodendateneinträge verwendet werden oder aus Abbildung 5-8 entnommen werden.
- Wenn im Bodenprofil eine nicht durchwurzelbare Schicht auftritt, so muss in der entsprechenden Dezimeterschicht das Wort ”imperm“ (impermeable = engl. undurchdringbar) eingefügt werden.
- Steht in einer Schicht Grundwasser an oder existiert eine wasserstauende Schicht, so muss in diesem Dezimeterintervall „water“ stehen (Abb. 5-12).

Weitere Informationen, die in der Bodentabelle (“Location“) hinterlegt sind, sind die NFKWE (nutzbare Feldkapazität in effektiven Wurzelraum) und die Wassermenge, die potenziell kapillar aus dem Grundwasser aufsteigen kann (H2OCAPD). Beide Einheiten hierfür sind in mm, die NFKWE in mm pro m² Boden und die H2OCAPD in mm pro Tag.

Beide Parameter sind optional und werden vom Programm verarbeitet, wenn sie zur Verfügung stehen.

Wenn „N-Sim” (Stickstoffsimulation) aktiviert ist (Häckchen bei „N-Simulation” in den Management Optionen gesetzt), müssen die Felder

„NPOOL_S" and „NPOOL_F" mit Daten gefüllt werden. Einzutragen sind hier die geschätzten oder gemessenen Stickstoffmengen (organisch) im Boden in kg pro Hektar, die jeweils der schnell (NPOOL_F) oder der langsam (NPOOL_S) mineralisierbaren Fraktion zuzurechen sind.

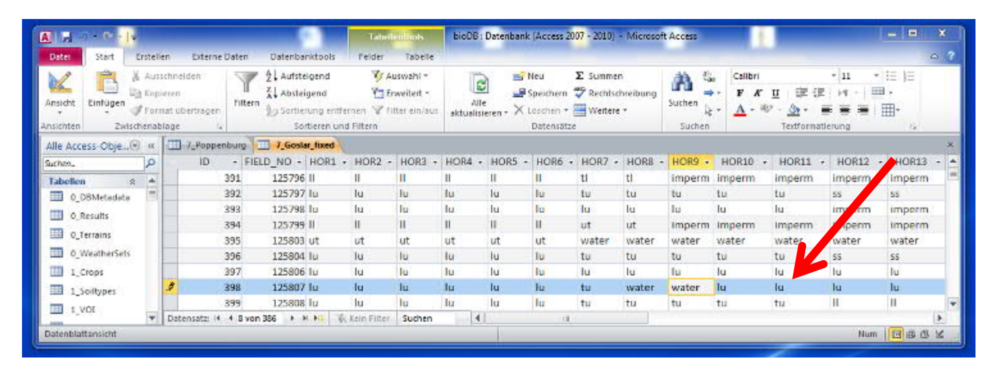


Abbildung 5-12: Bodenschichten (1-13) in einer Bodendatentabelle mit Bodenartenkürzeln aus der KA5 (ll, tl, lu, tu, ut, ss) und den Einträgen „water" und „imperm".

Die letzten drei Spalten enthalten jeweils die geografische Breite des Standortes (gerundete Grad ohne Minuten), die Wetter ID (WEATHER_ID). Auch wenn keine Verknüpfung mit einem speziellen Wetterdatensatz gewünscht ist, muss hier ein numerischer Werte stehen (z.B. 1).

In der letzten Spalte ("H2OSTART") kann ein Anfangswassergehalt im Bodenprofil (in % von 100 der NFKWE) angegeben werden. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn die Simulation als Zweitkultur nach einer Erstkultur gesät wird oder nach einem trockenen Winter oder Frühjahr nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Boden voll mit Wasser gesättigt ist.

Weather Data Tables (Wettertabellen) (8_name)

Wettertabellen werden im „Weather Data Selection" Menü (Abb. 5-13) mit einem vom Nutzer vergebenen Namen aufgelistet und sind (wenn sie mit der „New Table" Funktion kreiert worden sind) automatisch mit einer vorangestellten acht versehen.

Genau wie bei den Bodentabellen ("Location") enthalten diese eine vom Benutzer vergebene Flächennummer (FIELD_NO) und eine Wetter ID (WEATHER_ID) für jeden in der Tabelle enthaltenen Datensatz (12 Einträge bei Monatsmittelwerten und 365/366 bei Tageswerten).

Wenn die Wetterdaten mit bestimmten Bodenflächen in einer "Location"-Tabelle verknüpft werden sollen, so müssen alle Zeilen (12 oder 365/366) eines Wetterdatensatzes dieselbe Wetter ID wie der Bodendatensatz haben. Sollen alle Bodendatensätze einer „Location" Tabelle mit ein und demselben Wetterdatensatz verarbeitet werden (z.B. wenn alle dicht beieinanderliegen), bietet es sich an, allen Datensätzen dieselbe Wetter ID (z.B. eins) zu geben. Als Beispiele für Monats- und Tagesdatensätze siehe Abbildung 5-18 und 5-19.

Wetterdatentabellen können, wie bereits erläutert, zwei Typen annehmen. Der erste Typ, „monthly”, ist eine Wettertabelle die Monatsmittelwerte für das Klima enthält, mit jeweils 12 Einträgen. Der zweite Typ ist für Tagesklimawerte vorbehalten (daily) und muss 365 oder 366 (Schaltjahr) Einträge enthalten. In beiden Fällen muss die Spalte „W_DATE“ (Wetter_Datum) mit dem Access Datumsformat „short“ (12/31/2013) oder (31.12.2013) gefüllt werden. Im Falle der Monatsmittelwerte muss für alle 12 Monate immer der erste des Monats (also 01.01.2013, 01.02.2013, 01.03.2013 usw.) eingetragen werden. Im Falle von Tageswerten muss der eigentliche Tag (dasselbe Format) für jeden der 365/366 Tage eingetragen werden (Vergleich Abb. 5-18 und 5-19). Wetterdaten enthalten eine Flächenummer (FIELD_NO), das Datum (W_DATE), die Globalstrahlung in Joules * cm^{-2} (RJ), den Niederschlag in mm (PREC), die Temperatur in Grad Celsius (TCEL), die relative Luftfeuchte, ausgedrückt als Anteil von 1 (HAIRFR), die Windgeschwindigkeit in m * s^{-1} (WIND) und eine Wetter ID (WEATHER_ID), um Bodentabellen (Location) mit den Wetterdaten zu verknüpfen. Wetterdatentabellen können einzeln per Hand, mit Import oder Kopieren aus Excel befüllt werden.

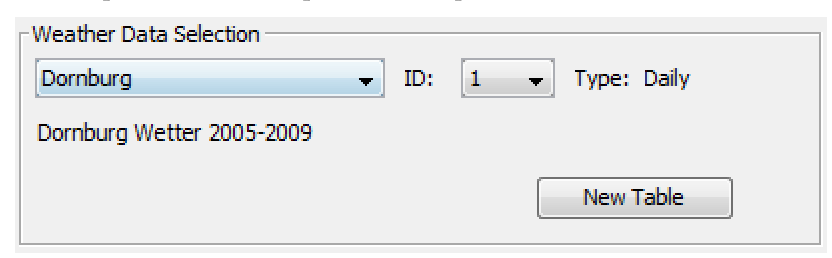


Abbildung 5-13: Wetterdatensatz Auswahlmenü mit Zusatzinformationen und Art der Tabelle (daily/monthly = Tages/Monatswerte).

3. Schritt: „Crop Selection“ (Kulturauswahl)

Kulturarten die in der Datentabelle „Crops“ angelegt sind, können über das Menü *„Crop Selection“* (Abb. 5-14) für Simulationen ausgewählt werden.

Anmerkung: Die Kulturen erscheinen im Menü in der Reihenfolge, in der sie in der Tabelle aufgelistet sind, die Reihenfolge kann also über die Tabelle verändert werden. Neue, vom Benutzer definierte Kulturen können in dieser Tabelle angelegt werden, sofern die erforderlichen Pflanzenparameter bekannt sind (siehe Pflanzenparameter unten).

4. Schritt: Growth-Engine (Wachstumsmotor) und ET_0-Methodenauswahl

Der Benutzer kann vor dem Start der Simulation zwischen vier Wachstumsmotoren (Azam-Ali et al. 1994) und vier ET_0-Berechnungsmethoden auswählen. Zusätzlich kann über „Ensemble“ jeweils für beide eine aus dem arithmetischen Mittel der Methoden berechnete Option ausgewählt werden.

Die Standardmethoden des Programms sind immer die CO_2-Methode (Wachstumsmotor) und die BioSTAR- Methode (ET_0-Berechnung).

Abbildung 5-14: Crop Selection (Kulturauswahl) Menü

Abbildung 5-15: Growth-Engine (Wachstumsmotorauswahl) und ET0-Methodenauswahl

5. Schritt: Management (Bewirtschaftung) Einstellungen und „Start Simulation“

Unter der Kulturartenauswahl und den Growth-Auswahlmenüs (Wachstumsmotor und ET0-methode) befinden sich die Einstellungsfelder für die Bewirtschaftung (*Crop Management*) (Abb. 5-16). Die hier vorgenommenen Einstellungen gelten für alle Simulationen, bis sie verändert werden oder das Programm geschlossen und wieder geöffnet wird

In den „Management“-Einstellungen werden der Tag der Aussaat (oder Pflanzung) (“*Planting Date*”), der Erntetag (“*Harvest Date*”), oder das angestrebte phänologische Entwicklungsstadium (BBCH-Skala) zur Ernte (“*BBCH-Harv.*”) ausgewählt.

Abbildung 5-16: Crop management (Bewirtschaftungsoptionen)

Wenn eine Simulation gestartet wird, bricht das Modell die Berechnung jeweils zu dem Zeitpunkt ab, der zuerst kommt, also entweder der Zeitpunkt des Erntedatums oder der des Ernte-BBCH-Stadiums.

Wenn eine Kultur für die Silagegewinnung (Biogas) geerntet wird, liegt das typische BBCH-Stadium zur Ernte bei etwa 75-85. Zu diesem Zeitpunkt hat die

Biomasse einen Trockensubstanzgehalt erreicht, der zwischen 25 – 40% liegt und daher gut silierbar ist. Wird eine Kultur für die Körnerernte o.ä. angebaut, dann sollte das Entwicklungsstadium zur Ernte bei 90 – 100 liegen (volle Reife).

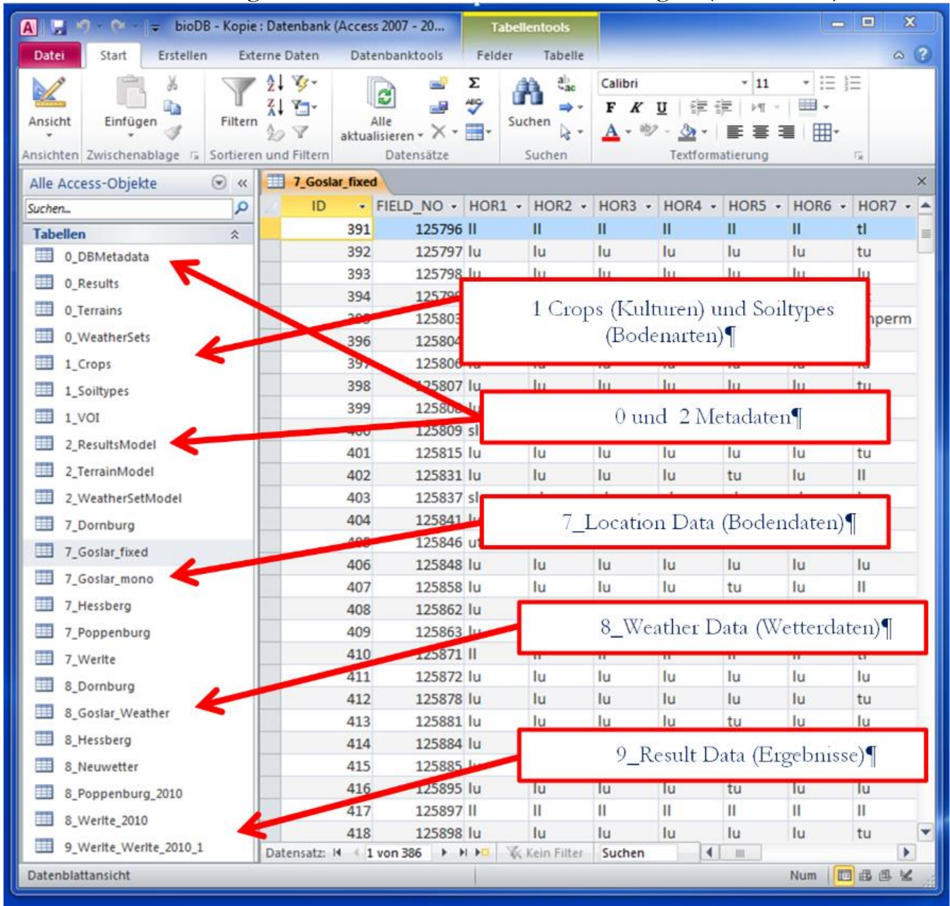
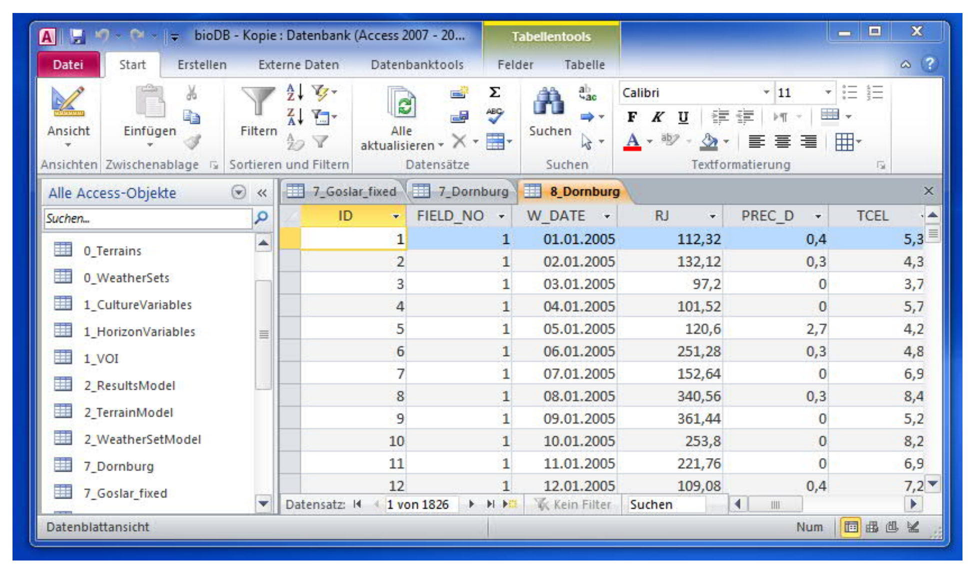


Abbildung 5-17: Auflistung der verschiedenen Tabellentypen in einer bioDB-Datenbank

Weitere Bewirtschaftungsoptionen sind die Gaben von Stickstoffdünger in kg pro Hektar, einmal als Anfangsgabe („*N-Start*“) und als zweite und dritte Gabe („*N-Mid and N-End*“) zu benutzerdefinierten Zeitpunkten. Die Zeitpunkte werden über die Datumsauswahlfelder „*N-Mid Date* und *N-End Date*“ ausgewählt. Die Stickstoffsimulation ist nur aktiviert, wenn das entsprechende Häckchen (N-Simulation) hierfür gesetzt ist.

Bewässerungsgaben können im Modell über die Eingabefelder „Irri-Start“, „Irri-Mid“, „Irri-End“ jeweils für drei Wachstumsphasen (1.Aussaat bis Schossen, 2.Schossen bis Blüte, 3.Blüte bis Reife) gesetzt werden. Die Eingaben verstehen sich als Liter pro m² pro Tag und gelten für alle Tage in den jeweiligen Phasen.

Wenn CO_2-Konzentrationen der Atmosphäre bei der Simulation verändert werden sollen, kann dies über das Feld „CO2-Con" getan werden. Die Voreinstellung liegt hier bei 390 ppm.



ID	FIELD_NO	W_DATE	RJ	PREC_D	TCEL
1	1	01.01.2005	112,32	0,4	5,3
2	1	02.01.2005	132,12	0,3	4,3
3	1	03.01.2005	97,2	0	3,7
4	1	04.01.2005	101,52	0	5,7
5	1	05.01.2005	120,6	2,7	4,2
6	1	06.01.2005	251,28	0,3	4,8
7	1	07.01.2005	152,64	0	6,9
8	1	08.01.2005	340,56	0,3	8,4
9	1	09.01.2005	361,44	0	5,2
10	1	10.01.2005	253,8	0	8,2
11	1	11.01.2005	221,76	0	6,9
12	1	12.01.2005	109,08	0,4	7,2

Abbildung 5-18: Wetterdatentabelle mit Tageswerten (nur 01.01.2005 bis 12.01.2005 werden angezeigt)

Anmerkung: Alle Kalibrierungen für die bereits hinterlegten Kulturen sind mit Ertragswerten vorgenommen worden, bei denen etwa 390 ppm CO_2 in der Atmosphäre vorlagen.

Der „Start Simulation"-Knopf startet eine Simulation mit den gewählten Einstellungen und den ausgewählten Boden- und Wettertabellen.

Result Data Tables (Ergebnistabellen) (9_Name)

Ergebnistabellen (Abb. 5-20) werden automatisch nach einer erfolgreichen Simulation (ohne Fehler) vom Programm generiert, mit einer Namenskombination von Boden- und Wetterdaten der Simulation versehen und mit einer vorangestellten Neun gekennzeichnet.

ID	FIELD_NO	W_DATE	RJ	PREC_D	TCEL
1	125796	01.01.2009	209	59,27	1,5
2	125796	01.02.2009	456	45,48	0,7
3	125796	01.03.2009	778	56,53	3,81
4	125796	01.04.2009	1311	60,48	7,65
5	125796	01.05.2009	1677	70,73	12,45
6	125796	01.06.2009	1724	82,93	15,51
7	125796	01.07.2009	1737	70,13	16,83
8	125796	01.08.2009	1512	72,99	16,54
9	125796	01.09.2009	966	53,63	13,41
10	125796	01.10.2009	569	48,69	9,32
11	125796	01.11.2009	253	60,27	4,64
12	125796	01.12.2009	151	70,27	1,5

Abbildung 5-19: Wetterdatentabelle mit Monatswerten für das Jahr 2009

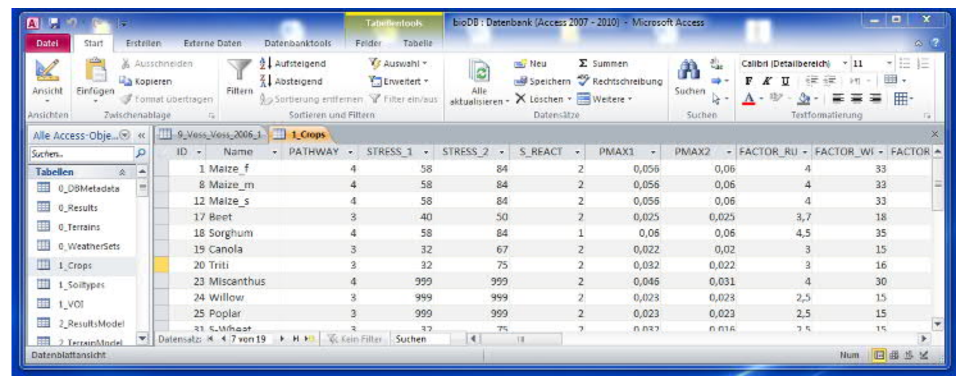
Daten die in die Ergebnistabellen geschrieben wird, bestehen aus einer Laufnummer (RUNNUM), der Flächennummer (FIELD_NO), dem Pflanz- oder Aussaattag (PLANTDATE), dem Erntetag (HARVESTDATE), der Kultur (CULTURE), der oberirdischen Biomasse in t/ha (DM), dem Ertrag (z.B. Korn) in t/ha (YIELD), der potenziellen Evapotranspiration in l/m² (ETPOT), dem Evapotranspirationskoeffizienten in l/kg Biomasse (ETC), der Bodenevaporations- und der Transpirationsmenge in l/m² (EVAP und TRANS), der in das Grundwasser versickerten Wassermenge in l/m² (DRAIN), dem Niederschlag in l/m² (PRECIP), dem Entwicklungsstadium zur Ernte der Kultur (DEVSTHARV) und einem Datums- und Zeitstempel (CREATIONDATE).

ID	RUNNUM	FIELD_NO	PLANTDATE	HARVESTDA	CULTURE	DM	YIELD	ETPOT	ETC
1	1	1	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	11,84286	4,251943	526,7872	242,622
2	1	2	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	9,759533	3,061149	526,7599	349,8707
3	1	3	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	15,75704	6,12967	526,8052	240,7845
4	1	4	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	9,759533	3,061149	526,7599	349,8707
5	1	5	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	15,75704	6,12967	526,8052	240,7845
6	1	6	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	8,798119	2,950598	526,7729	345,5373
7	1	7	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	15,75704	6,12967	526,8052	240,7845
8	1	8	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	15,75704	6,12967	526,8052	240,7845
9	1	9	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	13,15092	4,494681	526,7768	256,8065
10	1	11	25.04.2006	27.08.2006	Maize_f	12,519	4,249652	526,7754	269,0752

Abbildung 5-20: Ergebnistabelle (nur teilweise dargestellt)

Pflanzenvariablen (1_Crops)

Die „Crops“ Datentabelle enthält kulturspezifische Parameter (siehe Liste unten), welche für die Kalibrierung des Modells vom Benutzer verändert werden können (Abb. 5-21).



ID	Name	PATHWAY	STRESS_1	STRESS_2	S_REACT	PMAX1	PMAX2	FACTOR_RU	FACTOR_WI
1	Maize_f	4	58	84	2	0,056	0,06	4	33
8	Maize_m	4	58	84	2	0,056	0,06	4	33
12	Maize_s	4	58	84	2	0,056	0,06	4	33
17	Beet	3	40	50	2	0,025	0,025	3,7	18
18	Sorghum	4	58	84	1	0,06	0,06	4,5	35
19	Canola	3	32	67	2	0,022	0,02	3	15
20	Triti	3	32	75	2	0,032	0,022	3	16
23	Miscanthus	4	999	999	2	0,046	0,031	4	30
24	Willow	3	999	999	2	0,023	0,023	2,5	15
25	Poplar	3	999	999	2	0,023	0,023	2,5	15

Abbildung 5-21: Pflanzenparametertabelle (Crops) (nur teilweise dargestellt).

Pflanzenparameter

Name: Name der Kultur (Pflanze)

Pathway: C_3 or C_4 Fotosynthese (3 oder 4 eintragen)

STRESS_1 ; STRESS_2 ; STRESS_3: Mittelpunkte (auf der BBCH-Skala) von 3 pflanzenspezifischen Stressphasen, in denen Wasserstress die Biomasseproduktion (STRESS_1 und STRESS_2) und die Ertragsproduktion (STRESS_3) besonders beeinträchtigt

S_REACT: Pflanzentoleranz von Wasserstress, 1 = hoch, 2 = mittel, 3 = niedrig

PMAX1: Maximale CO_2-Austauschrate vor der Blüte in mmol $CO_2 * m^{-2} * s^{-1}$. Typischer Wertebereich: 0,02 – 0,07

PMAX2: Maximale CO_2-Austauschrate nach der Blüte in mmol $CO_2 * m^{-2} * s^{-1}$. Typischer Wertebereich: 0,02 – 0,07

FACTOR_RUE: Strahlungsnutzungseffizienz in Gramm Trockenmasse pro MJ Globalstrahlung. Typischer Wertebereich: 1,5 - 5

FACTOR_WP: Wasserproduktivität, ausgedrückt in Gramm Biomasse pro m^2 pro Tag. Typischer Wertebereich für C_3 und C_4-Pflanzen: 15-20 and 30-35 respektive

FACTOR_SD: Multiplikator im Exponenten in der Gleichung für die Reaktion des BTR zur Höhe des Sättigungsdefizits. Typische, vorkalibrierte Werte liegen zwischen 1,0 für C_4 und 0,75 for C_3 Pflanzen

FACTOR_BTR: Biomasse Transpirationsverhältnis ausgedrückt in kg $* m^{-2} *$ $kPa^{-1} * m^{-1}$. Abhängig von Klimaregion und mittlerem Sättigungsdefizit der Luft. Wertebereich zwischen 1 - 10

INTEXT: Anteil von blattinternem zu atmosphärischem CO_2-Gehalt. Werte für C_3 Pflamzen liegen typischerweise höher als bei C_4-Pflanzen (0,8 vs. 0,55)

MAXHIGHT: Typische maximale Pflanzenhöhe in Metern

K: Extinktions- Koeffizient (Lichtabschwächung) (dimensionslos). Typischer Bereich: 0,40 – 0,90

DEGMIN: Minimumtemperatur für Fotosynthese in Grad C

DEGMAX: Maximumtemperatur für Fotosynthese in Grad C

DEGOPT: Optimaltemperatur für Fotosynthese in Grad C

DEVMIN: Minimumtemperatur für Pflanzenentwicklung in Grad C

DEVMAX: : Maximaltemperatur für Pflanzenentwicklung in Grad C

DEVOPT: Optimaltemperatur für Pflanzenentwicklung in Grad C

FACTLAI: Typischer maximaler Blattflächenindexwert in m² pro m² Bodenfläche

HARVINDEX: Typischer Ertragsanteil (Korn, Kolben, Samen, Rübe)

STUBBLE: Anteil an der oberirdischen Gesamtbiomasse nach Abzug von Stoppeln

CRD_MAX: Typische maximale Wurzeltiefe der Kultur in cm

MAXROOT: Entwicklungsstadium bei dem die maximale Wurzeltiefe erreicht wird (typischerweise nach der Blüte mit BBCH = 65-70)

CULTTYPE: Kulturtyp (1 = Sommerung, 2 = Winterung, 3 = Dauerkultur)

Entwicklungsgeschwindigkeitsfaktoren (BBCH-Stadium in Klammern) (hier dargestellt am Beispiel für Getreide)

DSPEED_1: Faktor für Entwicklungsgeschwindigkeit von Aussaat bis Auflaufen (0-9)

DSPEED_2: Auflaufen bis 5-Blattstadium (10-14)

DSPEED_3: Winterruhe (Winterungen) oder 5-Blattstadium bis Bestockung (Sommerungen) (15-24)

DSPEED_4: 5-Blattstadium (15) (Winterungen) oder Bestockung (Sommerungen) bis Beginn Blüte (25-62)

DSPEED_5: Blüte bis frühe Milchreife (63-72)

DSPEED_6: Milchreife bis Vollreife (73-99)

NMINIMUM: Minimum an Stickstoffkonzentration in der Pflanze für Wachstum. Typischer Wertebereich: 0,4 – 0,8% von Gesamtbiomasse, mit niedrigeren Werten für C_4-und den höheren Werten für C_3-Pflanzen.

NCRITICAL: Stickstoffgrenzwert (Prozent von Optimum) für optimale Fotosynhese. Typischer Wertebereich: 35 – 65% mit niedrigeren Werten für C_4- und den höheren Werten für C_3-Pflanzen.

Koeffizienten für die Erhaltungsatmung, ausgedrückt in Gramm CO_2 pro Gramm Biomasse pro Tag.

MCL: Koeffizient für Blätter.

MCS: Koeffizient für Stengel.

MCR: Koeffizient für Wurzeln.

Typische Wertebereiche für die Koeffizienten liegen bei: 0,01 (Stengel), 0,015 (Wurzeln) und 0,01 – 0,035 (Blätter).

Koeffizienten für die Wachstumsatmung, ausgedrückt als der verbleibende Anteil an Assimilaten nach der Veratmung.

YGL: Koeffizient für Blätter.

YGS: Koeffizient für Stengel.

YGR: Koeffizient für Wurzeln.

YGF: Koeffizient für Ertragsorgane.

Bodenarten (Soiltypes) (1_Soiltypes)

Die Datenbanktabelle „Soiltypes" (Abb. 5-22) enthält Informationen über Bodenarten (nach Korngrößenverteilung) und deren hydraulische Eigenschaften.

Die van Genuchten-Parameter der 11 FAO/WRB Bodenarten sowie die der mehr differenzierten KA5 (Ad-hoc AG Boden 2005) und die der Bodenschätzung (Bodenschätzungsrahmen) sind hier hinterlegt. Es können auch weitere, vom Benutzer definierte Bodenarten hinzugefügt werden, wenn die entsprechenden Parameter bekannt sind.

Die erste Spalte enthält die der jeweiligen Nomenklatur entsprechende Bezeichnung der Bodenart (TYPE).

Die hydraulischen Parameter der Bodenarten folgen in den Spalten GALPHA (Parameter Alpha), GPARN (Parameter n), GPARM (Parameter m), GPARX (Parameter x), FLOWSAT (K_s) (gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm/Tag), THETAR (Parameter Θ_r), THETAS (Parameter Θ_s), FIELDCAP (Porenvolumen am Punkt der Feldkapazität in %), TPV (Gesamtporenvolumen in %), PWP (Porenvolumen über dem permanenten Welkepunkt in %),

Der Parameter x sollte eingetragen werden solange dieser bekannt ist, ansonsten wird er vom Programm auf null gesetzt, um die Bodendaten verarbeiten zu können. Die beiden letzten Spalten enthalten Informationen zum N-Mineralisationstyp (NMINTYPE) des Bodens (Gruppe 1,2 und 3) sowie die effektive Durchwurzelungstiefe (ERD) dieser Bodenart in cm.

Metadatentabellen (0_Name und 2_Name)

Es gibt sieben Metadatentabellen. Die ersten vier sind mit einer vorangestellten Null gekennzeichnet (0_DBMetadata, 0_Results, 0_Terrains, 0_WeatherSets). Die DBMetadata-Tabelle enthält lediglich die Versionsnummer der Datenbank. Die Tabellen „0_Results", „0_Terrains" und „0_WeatherSets" enthalten eine Auflistung von Ergebnis-, Boden- und Wettertabellen, die in der Datenbank angelegt

sind. Wird über die Schaltflächen „New Table" eine Boden- oder Wettertabelle generiert, so wird diese automatisch in den Metatabellen angelegt. Wird eine Ergebnistabelle generiert, so wir diese in der Results-Tabelle angelegt. Werden manuell Tabellen zur Datenbank hinzugefügt, gelöscht oder Namensänderungen vorgenommen, so muss auch in der entsprechenden Tabelle ("Results", „Terrains" und „WeatherSets") die Änderung vorgenommen werden, da es sonst zu Fehlermeldungen kommen kann.

ID	Type	GALPHA	GPARN	GPARM	GPARX	FLOWSAT	THETAR	THETAS	FIELDCAP	TPV	PWP
44	sand	0,0535	2,0468	0,51143248	-0,594	540	5,11	54,56	16	38	5,152
54	sandy-clay	0,027	1,23	0,18699187	0	2,88	10	38	29	40	16,9
50	sandy-clay-loan	0,059	1,48	0,324324324	0	31,44	10	39	20	40	11,0
46	sandy-loam	0,0252	1,3867	0,278863489	-0,594	199	5,09	38,7	28,5	38	8,42
47	silt	0,0105	1,631	0,386879215	0	37,65	4,8	54,84	46	40	6,
49	silt-loam	0,02	1,41	0,290780142	0	10,8	6,7	45	32	40	10,3
48	silty-clay	0,005	1,09	0,082568807	0	0,48	7	36	35	40	26,5
52	silty-clay-loam	0,01	1,23	0,18699187	0	6,24	8,9	43	38	40	19,5
36	sl	0,09375	1,30261	0,232307	0	141,316	2,6	39,51	21,325	40	6,6

Abbildung 5-22: Bodenartenvariablen (nur teilweise dargestellt).

Die anderen drei Metadatentabellen (2_ResultsModel, 2_TerrainModel, 2_WeatherSetModel) enthalten Informationen zu Datentypen und wie die Tabellen in einer bioDB-Datenbank angelegt werden müssen. ***Diese sollten vom Benutzer nicht verändert werden, da es sonst zu Fehlern im Programm kommen kann.***

Literatur

Ad-Hoc-AG Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung.* 5. Auflage, Hannover.

Azam-Ali, S., Crout, N.M.J. & Bradley, R.G. (1994). *Perspectives in modelling resource capture by crops.* Nottingham University Press, UK.

Monteith, J.L. (1977). Climate and crop efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B*, 281:277-329.

Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science,* 25:189–207.

Tanner, C.B. & Sinclair, T.R.(1983). Efficient water use in crop production: Research or Research? In Taylor, H.M., Jordan, W.R. & Sinclair, T.R. (eds.): *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.* Amer. Soc. Agron, Madison, WI, USA.

In einem interdisziplinären Ansatz werden die Chancen und Risiken der Bioenergie im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung beleuchtet. Es werden Schwierigkeiten und Wege zu ihrer Überwindung aufgezeigt, wie die Produktion und die energetische Nutzung der Biomasse mit den Anforderungen des Klimaschutzes, der Biodiversität, des Landschaftsschutzes sowie der Nahrungsmittelversorgung aber auch mit ökonomischen Aspekten in Einklang zu bringen ist.
Die teilweise konträren Argumente müssen in gemeinsamen Beratungen abgewogen werden, eine Basis für die Akzeptanz bei den Akteuren und der Bevölkerung. Es werden Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung und Lösungsansätze zur Problemminimierung auf lokaler wie regionaler Ebene vorgestellt. Es wird beispielweise gezeigt, wie Energiepflanzen zum Artenreichtum beitragen können, wie die Akteure konsensorientiert zusammengeführt und Dorfbewohner in Entscheidungen integriert werden können, aber auch welche ökonomischen Folgen für die Landwirte und die regionale Wertschöpfung resultieren.
Es wird angeregt, auf belasteten Flächen Energiepflanzen anzubauen, die wenig Schadstoffe aufnehmen. Weiterhin wird gezeigt, wie Emissionen von Schadstoffen bei der Verbrennung von Biomasse minimiert werden können.



ISBN: 978-3-86395-164-1

Universitätsverlag Göttingen